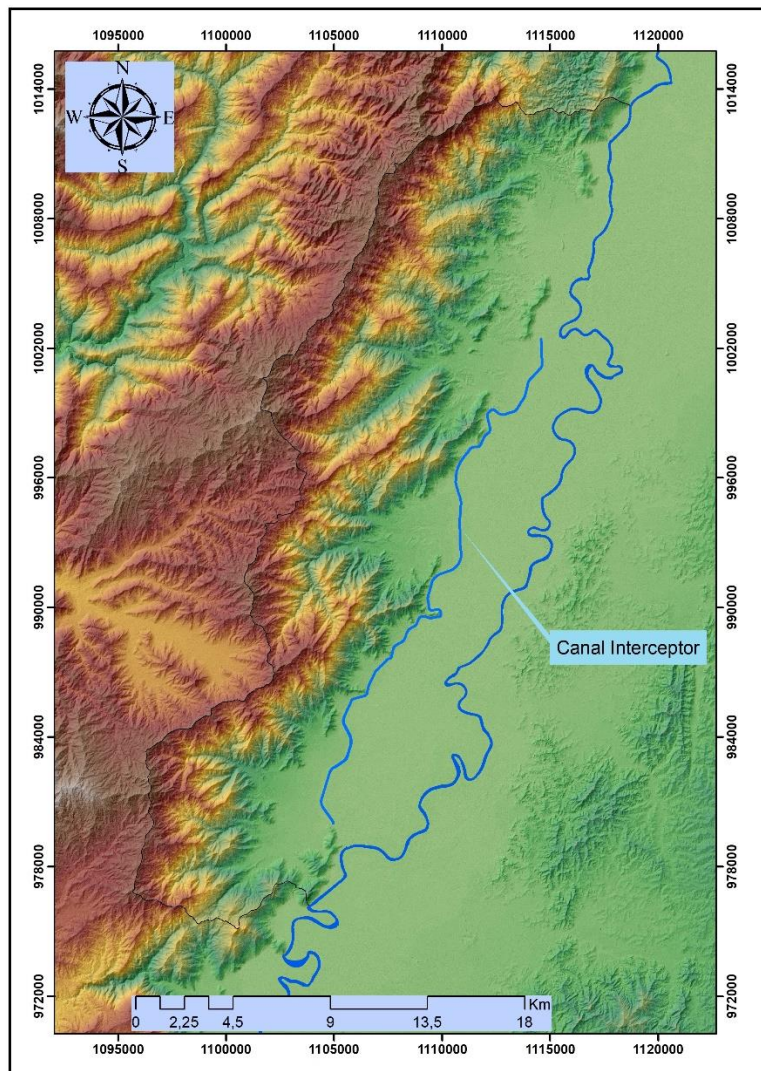


TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN

MODELACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA Y EFECTOS DE LA COBERTURA VEGETAL EN EL APOORTE DE SEDIMENTOS AL CANAL INTERCEPTOR DEL DISTRITO DE RIEGO ROLDANILLO- LA UNIÓN Y TORO.



HERNÁN MATERÓN MUÑOZ

Directores

NORBERTO URRUTIA COBO - ANDRÉS FERNANDO ECHEVERRI SÁNCHEZ

**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE -
EIDENAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

Santiago de Cali, septiembre de 2018

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. MARCO CONCEPTUAL.....	11
2.1. MODELO USLE.....	13
2.2. FACTOR R.....	13
2.3. FACTOR K.....	14
2.4. FACTOR LS.....	14
2.5. FACTOR C.....	15
2.6. FACTOR P.....	16
3. OBJETIVOS.....	17
3.1. Objetivo General.....	17
3.2. Objetivos Específicos.....	17
4. METODOLOGÍA.....	18
4.1. ZONA DE ESTUDIO.....	18
4.2. Enfoque metodológico.....	19
4.2.1. Procedimiento para estimar el Factor de erosividad de la lluvia R.	20
4.2.2. Procedimiento para estimar el Factor de erosionabilidad del suelo K.	23
4.2.3. Procedimiento para estimar el factor topográfico L.S.....	25
4.2.4. Procedimiento para estimar el factor de cobertura vegetal C.....	28
4.2.5. Determinación del factor de manejo de prácticas de conservación P.....	30
4.3. Red Hídrica y canal interceptor.....	31
4.3.1. Red hídrica y corrientes principales.	32
4.3.2. Canal interceptor del Distrito de Riego RUT.....	33
4.4. Costos y Tasas de extracción de sedimentos en canal interceptor.....	34
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	39
5.1. Resultados factor R – zona de estudio.....	39
5.1.1. Método directo.....	39
5.1.2. Método Indirecto.....	40
5.1.3. Aproximación a un ajuste de las series a un modelo lineal o linealizable.....	40
5.1.4. Ajuste de las series de precipitación a modelos no linealizables.....	42
5.1.5. Valores totales mensuales del factor R.....	45
5.1.6. Mapa de curvas isoerodental – Factor R.....	46

5.2. Resultados factor K en zona de estudio	50
5.3. Resultados Factor topográfico L.S. en zona de estudio.....	53
5.4. Resultados Factor C – cobertura vegetal en zona de estudio.....	55
5.5. Factor P de prácticas de conservación de suelos en zona de estudio	57
5.6. Erosión potencial en zona de estudio	57
5.7. Erosión REAL en zona de estudio	59
5.7.1. Estimación de la erosión neta en zona de estudio	59
5.8. Erosión potencial en zona CRÍTICA.	62
5.9. Erosión REAL en zona crítica.	64
5.10. Efectos de la cobertura vegetal en zona crítica	66
5.11. Efectos de la cobertura vegetal en el volumen de sedimentos en el canal interceptor en zona crítica.....	70
5.12. Factor P - Manejo del suelo.....	71
5.13. Análisis General	73
6. CONCLUSIONES.....	77
7. RECOMENDACIONES.....	78
8. REFERENCIAS	79
9. ANEXOS.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización cuenca RUT y zona de Estudio.	18
Figura 2. Modelamiento para la determinación de la erosión actual y potencial – Metodología USLE mediante un SIG.....	19
Figura 3. Red de estaciones pluviométricas de la CVC y Pluviográfica del IDEAM.	21
Figura 4. Factor topográfico LS – efecto de la pendiente	27
Figura 5. Sistema hídrico natural tributario al canal interceptor – zona de estudio.	32
Figura 6. Cuenca RUT – zona de estudio y canal interceptor	34
Figura 7. Dragado canal interceptor y depósito en cajuelas (fuente ASORUT)	35
Figura 8. Residuos flotantes en el canal y en estructuras hidráulicas (fuente ASORUT)..	35
Figura 9. Mantenimiento canal interceptor del RUT – años 2014 y 2015 (fuente: ASORUT, 2016)	36
Figura 10. Costo de operación y mantenimiento por Km de canal interceptor (fuente: ASORUT, 2016).....	36
Figura 11. Tramo crítico canal interceptor.....	37
Figura 12. Áreas de drenaje asociadas a tramo crítico.	38
Figura 13. Diagrama de dispersión Est. Isugú vs Est. El Orégano y Est. El Porvenir	41
Figura 14. Diagrama de dispersión Est. Isugú vs Est. Buenavista y Est. El Lucero.....	41
Figura 15. Diagrama de dispersión Est. Isugú vs Est. Sabanazo y Est. La Despensa	42
Figura 16. Diagrama de dispersión Est. Isugú vs Est. El Aguacate y Est. Montecristo	42
Figura 17. Ajuste Est. Isugú vs Est. Sabanazo y Est. El Porvenir	43
Figura 18. Ajuste Est. Isugú vs Est. Buenavista y Est. El Aguacate	44
Figura 19. Ajuste Est. Isugú vs Est. La Despensa y Est. El Aguacate.....	44
Figura 20. Ajuste Est. Isugú vs Est. Montecristo y Est. El Oregano.....	44
Figura 21. Modelo de ajuste entre precipitación y factor R.....	45
Figura 22. Distribución de la erosividad de la lluvia a través del año, áreas de drenaje Quebradas Cáceres - Roldanillo hasta Quebrada La Culebrera – Periodo: 2012 a 2016.	46
Figura 23. Polígonos de Thiessen – Zona de estudio	47
Figura 24. Mapa isoerodental – Factor R (Imagen raster).....	48
Figura 25. Curvas isoerodental – Factor R – zona de estudio.....	49
Figura 26. Factor K – imagen Raster, zona de estudio	52
Figura 27. Factor L.S – imagen Raster, zona de estudio.	54
Figura 28. Factor C de cobertura vegetal en zona de estudio	56
Figura 29. Mapa de erosión potencial en zona de estudio.	58
Figura 30. Erosión actual en zona de estudio	60
Figura 31. Esquema para determinación de sedimento acumulado en el fondo de un canal	61
Figura 32. Mapa de erosión potencial en zona crítica	63
Figura 33. Mapa de erosión actual en zona crítica (5 km).....	65
Figura 34. Simulación de coberturas, escenarios homogéneos y uno priorizado, en áreas.	68
Figura 35. Simulación de coberturas, escenarios homogéneos y uno priorizado, en porcentajes de áreas.	68
Figura 36. Línea base y escenarios de erosión hídrica	69

Figura 37. Escenarios y Volúmenes de sedimentación en canal interceptor – zona crítica.	70
Figura 38. Zona crítica – aplicación del factor P.....	71
Figura 39. Aplicación del factor P en zona crítica – Volúmenes de sedimentos en línea base, y escenarios 5 y 6 - volúmenes de sedimento en m3.....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información hidroclimatológica (red de estaciones).....	20
Tabla 2. Valores de K asociados a textura y Materia orgánica, según Kirkby y Morgan, 1980.	24
Tabla 3. <i>Valores del factor topográfico LS, para combinaciones específicas de longitud de pendiente e inclinación.</i>	27
Tabla 4. Rango de pendientes y clasificación	28
Tabla 5. Valores medios del factor cultivo y/o vegetación C (según Robredo, J.S.)	29
Tabla 6. Valores de C para diferentes cultivos	30
Tabla 7. Factor P para distintas prácticas de conservación de suelos (Wischmeier y Smith, 1979)	31
Tabla 8. tasas de extracción de sedimentos – canal interceptor – 2010 a 2016 (fuente ASORUT).	35
Tabla 9. Ejemplo de cálculo de EI para un evento de lluvia	39
Tabla 10. Cálculo de EI para lluvias	40
Tabla 11. Valores totales mensuales de precipitación (mm) – periodo: 2012 a 2016	40
Tabla 12. Resumen de ajuste de un modelo de regresión lineal (o linealizable)	41
Tabla 13. Comparación de Modelos de ajuste para el comportamiento de lluvias mensuales entre estaciones influyentes (Periodo: 2012 – 2016).....	43
Tabla 14. Valores totales mensuales del factor R – Periodo hidrológico: 2012 a 2016....	45
Tabla 15. Clasificación de rangos típicos de R anual.....	46
Tabla 16. Definición de rangos de R anual	47
Tabla 17. Identificación de unidades de suelos en zona de Ladera en área de estudio. ..	50
Tabla 18. Identificación de unidades de suelos zona plana en área de estudio (año 2004) – Fuente CVC.	51
Tabla 19. Rangos Factor K zona de estudio	51
Tabla 20. Rangos de pendientes y áreas – Zona de estudio cuenca RUT	53
Tabla 21. Valores del factor L.S para cada rango de pendiente.	53
Tabla 22. Rangos de Factor L.S	53
Tabla 23. Rangos de factor C de cobertura vegetal	55
Tabla 24. Clasificación de la erosión potencial, rangos y áreas en zona de estudio	57
Tabla 25. Clasificación de la Rangos de erosión real, rangos y áreas en zona de estudio	59
Tabla 26. Rangos calculados de erosión real, áreas y volumen neto de sedimentos anuales en zona de estudio	62
Tabla 27. Clasificación de la erosión potencial, rangos y áreas en zona crítica.	62
Tabla 28. Clasificación de la erosión real, rangos y áreas en zona crítica.....	64
Tabla 29. Rangos de erosión real, áreas y volumen neto de sedimentos anuales en zona crítica.....	64
Tabla 30. Resultados de simulación de escenarios de efectos de cobertura vegetal sobre erosión real, en áreas.	66
Tabla 31. Resultados de simulación de escenarios de efectos de cobertura vegetal sobre erosión real, en porcentajes de áreas.	67
Tabla 32. Resumen de volúmenes de sedimentos en canal interceptor para cada uno de los escenarios aplicados en zona crítica.	70
Tabla 33. Comparativo línea base y escenarios 5 y 6 en términos de áreas afectadas en zona crítica.	72

Tabla 34. Comparativo línea base y escenarios 5 y 6 en términos volúmenes de sedimento en canal interceptor.	72
---	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo I: Perfil modal CVC – 186

Anexo II: Perfil Modal CVC - 150

Anexo III: Perfil Modal CVC - 133

Anexo IV: Perfil modal CVC – 132

Anexo V: Localización geográfica de calicatas CVC - RUT

Anexo VI: Clasificación taxonómica, pendiente, erosión, drenaje, calicatas CVC-RUT

Anexo VII: Profundidad efectiva, afloramiento, pedregosidad y perfil, calicatas CVC-RUT

Anexo VIII: Clase pendiente, planchas cartográficas, temperatura, calicatas CVC-RUT

Anexo IX: Clase, tipo erosión, movimientos en masa, calicatas CVC – RUT

Anexo X: Límite profundidad efectiva, epipedon, endopedon, calicatas CVC-RUT

Anexo: XI: Vegetación natural, calicatas CVC – RUT

Anexo XII: Uso actual, cultivos-especies-forestal animal, limitantes, calicatas CVC-RUT

Resumen

Se simula la pérdida de suelos por erosión hídrica y se evalúa el efecto de la cobertura vegetal en la producción de sedimentos provenientes de la red hídrica de la cuenca RUT, con énfasis en la deposición de azolves en un tramo del canal interceptor de 5 km de largo considerado crítico y de especial interés para el Distrito de Riego Roldanillo – La Unión y Toro (RUT). Se aplica el principio de la ecuación universal de los suelos, metodología USLE, y el modelamiento a través de un sistema de información geográfico (SIG); mediante análisis espacial y superposición de mapas temáticos, se obtiene la pérdida de suelo actual y potencial por erosión hídrica en algunas áreas de drenaje tributarias al canal interceptor. Se analiza el comportamiento de la erosión en algunas áreas de drenaje tributarias al canal interceptor y se evalúa la efectividad de la cubierta vegetal en el control de la degradación del suelo por causa de la lluvia. El potencial erosivo de la lluvia se evidencia con mayor intensidad en los extremos sur y norte de la cuenca RUT, se sitúa en el rango de clase mediana, entre 1800 a 2600 MJ/ha*mm/hr. En el canal interceptor, en línea base o de erosión actual, se depositan anualmente 23,553 m³, con el 10% de cobertura 22,834 m³, con el 20% 21,634 m³, con el 40% 16,192 m³, y con el 60% 12,930 m³; en un escenario priorizado, se cubre el 40% de un área tres veces menor, y alcanza una descarga de 18,149 m³. La acción conjunta de la cobertura vegetal y el manejo de suelos en la denominada zona crítica puede lograr reducciones de hasta el 25.6% en la descarga de azolves en el canal interceptor entre los kilómetros 25 a 30.

Palabras clave: Simulación erosión actual y potencial, modelo USLE en cuencas hidrográficas

1. INTRODUCCIÓN

La superficie de la tierra se encuentra sometida a un conjunto de fenómenos geológicos y climatológicos que definen en el tiempo la dinámica de sus paisajes y la evolución de sus componentes naturales. Una evidencia es la degradación de los suelos representado por la erosión y la sedimentación que corresponden a procesos de transferencia de masa y energía, fenómenos inherentes al ciclo del agua y de las rocas; la erosión o degradación del suelo forma parte del moldeado de la superficie terrestre, se trata entonces de procesos naturales que forman parte de la interacción del hombre con el medio ambiente.

El cambio climático y las variaciones climáticas de los últimos tiempos, son fenómenos que están produciendo marcadas alteraciones en el régimen hidrológico local y mundial, caso de la ocurrencia de lluvias de mayor intensidad y duración; la presencia de estos eventos agudizan el problema de degradación de los suelos en cuencas sin cobertura vegetal, aceleran la erosión hídrica y son generadores de impactos ambientales cada vez más severos, situación que atenta contra la seguridad alimentaria y la misma sostenibilidad del territorio.

La erosión de los suelos no es exclusiva a causas naturales, también lo es por acción del hombre; una población en crecimiento demográfico implica una mayor presión sobre los servicios ecosistémicos afectando progresivamente la sostenibilidad ambiental, este hecho, perturba el equilibrio que se genera a través de la relación armónica que debe existir entre la sociedad y la naturaleza.

En referencia a indicadores de estado de la erosión en Colombia, el 40% equivalente a 45.379.058 ha de la superficie continental e insular de Colombia, presenta algún grado de degradación de suelos por erosión; de esta parte del territorio afectado, el 20% presenta erosión ligera, el 17% erosión moderada, el 3% erosión severa y el 0.2% erosión muy severa. La erosión más recurrente en Colombia es la erosión hídrica por acción del agua, y en menor proporción la erosión eólica, que alcanza sólo el 0.61% del total por acción del viento (IDEAM. 2015).

Entre 1990 y 2010, el país ha perdido cerca de 6.2 millones de hectáreas que equivalen a una tasa de deforestación de 310,349 hectáreas/año, siendo las principales causas la ampliación de la frontera agrícola y la minería ilegal, así como el establecimiento de cultivos ilícitos (IDEAM – ONU, 2014).

La principal causa de la erosión hídrica es la falta de cobertura vegetal. El impacto de las lluvias sobre suelos desnudos aumenta el escurrimiento superficial y el transporte de tierra, por lo tanto, para controlar la erosión la acción más efectiva es el uso de la cobertura vegetal. La disminución de los impactos ambientales por causa de la erosión hídrica se puede mitigar a través del establecimiento de vegetación apropiada, en armonía con las condiciones agrológicas de los suelos, la fisiología y morfología de las plantas, y la respuesta de las coberturas a condiciones extremas. Sin embargo, escapa a los alcances del presente trabajo la selección de las especies vegetales para recuperación de áreas degradadas.

Para establecer el efecto de la cobertura vegetal en cuencas degradadas por la erosión y en la producción de sedimentos, se seleccionó un sector de la cuenca Roldanillo - La Unión

y Toro – RUT, Departamento del Valle del Cauca, Colombia, en donde se conjugan la deforestación, el manejo inadecuado de los suelos, la ocupación de un humedal para agricultura y la incidencia de fenómenos de variabilidad climática, situación que potencia la ocurrencia de problemas ambientales, en manifestaciones tales como procesos de degradación de suelos, sedimentación en canales, crecientes e inundaciones.

En el presente trabajo se recurre al uso de herramientas informáticas, específicamente la aplicación de sistemas de información geográfica y análisis espacial, para simular la erosión hídrica y el efecto de la cobertura vegetal en el aporte de sedimentos en el canal interceptor del Distrito de Riego de Roldanillo - La Unión y Toro. En consideración al gran tamaño del área de la cuenca e información de campo disponible, se decidió seleccionar algunas áreas de drenaje tributarias, en razón a que se consideran críticas y representativas, y lo más importante, porque el Distrito RUT cuenta con información sobre los volúmenes de dragado de sedimentos en un tramo de aproximadamente 5 km de canal interceptor.

Después de procesar y aplicar todos los factores que conforman la ecuación universal de los suelos, se procedió a evaluar en diferentes escenarios el efecto del factor de cobertura vegetal en el control de la degradación de los suelos y el depósito de sedimentos en el canal interceptor del Distrito de Riego RUT.

2. MARCO CONCEPTUAL

El conocimiento de los procesos erosivos, en especial los relacionados con las actividades antrópicas, históricamente ha sido objeto de previas y numerosas investigaciones, y de procedimientos propuestos, las cuales en su evolución dieron soporte a la denominada ecuación universal de pérdida de suelo, USLE (Universal Soil Loss Equation), formulada en 1962 y publicada posteriormente en el Manual 534 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Wischmeier y Smith, 1978).

El Modelo USLE es de tipo empírico, fue diseñado para predecir la cantidad de pérdida de suelo en áreas específicas bajo determinados sistemas de manejo de cultivos y ha sido objeto de revisión y mejoramiento continuo, obteniendo como resultado el modelo MUSLE (USLE modificado).

La labor de preparar nuevas metodologías para la evaluación de la erosión hídrica, destinada a sustituir a la USLE y MUSLE continúa a través del tiempo, pero es necesario reconocer que las expresiones empíricas USLE y MUSLE tienen un valor insustituible y que permanece vigente en la era en que se imponen los modelos con base física, se trata de una herramienta práctica y muy útil para la gestión del control de la erosión.

Los modelos empíricos USLE Y MUSLE tienen una gran base de datos experimentales, producto de numerosas actividades investigativas, sobre los que puede y debe apoyarse la fase de validación de los modelos basados en los procesos físicos, formalmente más correctos y generalizables (González del Tánago, M., 1991).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE, a través del tiempo, se ha modificado con diversos objetivos, evolucionó hacia el modelo MUSLE sustituyendo el componente de energía erosiva de las lluvias por un componente que estima la capacidad erosiva y de transporte del escurrimiento, con el fin de estimar la producción de sedimentos ocasionados por lluvias individuales. En la evolución de los modelos de erosión de USLE, se desarrolló el CREAMS (Chemical, Runoff, Erosion on Agricultural Managemet Systems, Knisel, 1980) se diseñó para estimar el movimiento de contaminantes, escurrimiento y erosión en campos de cultivos específicos.

En el marco de la evolución de los modelos de erosión de USLE es importante destacar el Modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator, Williams et al, 1984), el cual permite evaluar las relaciones entre la productividad de los cultivos, su manejo e impacto sobre el suelo y el agua. Se integran nuevos componentes al modelo original de erosión, por ejemplo, el componente de generación climática, así como un componente de plaguicidas, derivado del modelo GLEAMS desarrollado para evaluar el impacto de los cultivos sobre el medio ambiente.

En la escala de tiempo en cuanto evolución de componentes, es el SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins; Williams et al, 1985; Arnold et al, 1990), se enfoca en la evaluación del impacto que el uso y manejo de la tierra causa sobre la producción de agua y sedimentos en cuencas agrícolas. En materia de procesos, se desarrolló el SWRRB-WQ (Simulator for Water Resources in Rural Basins – Water Quality, Arnold et al, 1991; US – EPA, 1994), incluye un componente de calidad de aguas, nutrimentos y plaguicidas, derivado de los componentes CREAMS, EPIC y GLEAMS.

Resultado de las actualizaciones y adiciones, se desarrolló el SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al 1995; USDA-ARS-BRC, 1999), orientado a simular cuencas fluviales de gran tamaño; se inserta un componente de tránsito de sedimentos y escurrimiento, igualmente incluye componentes de reservorios y embalses calidad de aguas y sedimentos (nutrimentos y pesticidas), y un componente de desarrollo de bacterias (Silva, O., 2002).

Resultado de la evolución de los modelos de erosión, se desarrollaron versiones de SWAT con interfaz para sistemas de información geográfica, como SWAT-GRASS (Srinivasan et al, 1996; USDA-ARS-BRC, 1998) y SWAT para Arc-View (Neitsch et al, 1999; USDA-ARS-BRC, 2000). Estos últimos modelos se utilizan para transformar la información contenida en mapas digitales y sus valores asociados en función de los requerimientos del modelo de erosión (Silva, O., 2002).

Cada día aumenta el conocimiento de los mecanismos que entran en juego en el control de la erosión, observaciones que permiten la evolución de los modelos empíricos hacia los modelos con base física, sin embargo en la actualidad, la disponibilidad de modernas herramientas como los sistemas de información geográfico, y el aprovechamiento de un gran volumen de información georreferenciadas, producto de estudios detallados y semi-detallados del suelo, materia orgánica, texturas, estructuras, profundidades de los horizontes, propiedades físicas y componentes químicos, coberturas del suelo, tamaño de áreas, pendientes, registros de lluvia y manejo del suelo, permiten mediante la técnica de superposición de capas, realizar operaciones georreferenciadas para simular procesos y obtener información automatizada con base en todos los componentes de la ecuación universal de pérdidas de suelo.

La ecuación universal permite estimar las pérdidas de suelo anuales, como valor promedio de un período representativo en años, que se producen en un área específica de interés, fenómeno debido a la erosión hídrica o laminar, en el marco de unas determinadas condiciones geológicas (suelo, relieve), hidroclimatológicas, vegetación y uso del suelo.

2.1. MODELO USLE

El modelo USLE se representa mediante la siguiente ecuación general:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Donde

A: representa la pérdida de suelo en t/ha/año

R: factor de erosividad de la lluvia, en Mj mm/ha.año.

K: factor de erosionabilidad del suelo, en t/ha/(Mj.mm)/(ha.h)

L: factor de longitud del terreno (adimensional)

S: factor de pendiente del terreno (adimensional)

C: factor de cobertura y manejo de la vegetación (adimensional)

P: factor de prácticas de conservación (adimensional)

Para la determinación de la erosión potencial se tienen en cuenta los tres primeros parámetros de la ecuación ($R * K * L * S$), mientras que el cálculo de la erosión real incluye todos los parámetros del modelo USLE.

2.2. FACTOR R

El primer factor erosivo a considerar en la ecuación universal es la lluvia, fenómeno físico determinante en la erosión superficial, define el término R de la ecuación y representa el índice de erosividad de las lluvias, en términos de la energía cinética y de la intensidad máxima de cada evento.

Cada vez que llueve, las gotas de lluvia golpean la tierra con fuerza sorprendente. Cada gota actúa como una pequeña bomba, haciendo estallar partículas del suelo móviles fuera de sus posiciones de la masa de suelo. A continuación, el agua que fluye a través de la superficie arrastra partículas de suelo desalojadas. El suelo es movido por finas láminas de agua, este proceso se denomina erosión laminar (Tarbuck y Lutgens, 1999).

El factor R representa entonces al potencial erosivo de la lluvia que afecta al suelo, en general, las gotas de agua golpean más fuerte al suelo con el aumento de la intensidad de la lluvia, sin embargo, una lluvia leve y de larga duración puede alcanzar la misma energía total que una lluvia intensa y de corta duración. El efecto de la energía y la intensidad del evento determinan entonces el potencial erosivo de la lluvia, las características del desprendimiento del suelo y la capacidad de transporte del material.

En el contexto de mejoramiento del proceso de pérdida de suelo y de la ecuación universal, se puede destacar el proyecto WEPP (Water Erosion Prediction Project) que trata de analizar el problema de la erosión desde un punto de vista físico y descriptivo matemáticamente, y para ello parte del planteamiento inicial propuesto por Meyer y Wischmeier (1969), donde se diferencia la acción de la gota de lluvia y la acción de la escorrentía, su capacidad de remoción del suelo y su capacidad de transporte, factores activos de la erosión; y por otra, las características del suelo en cuanto a su vulnerabilidad a ser desmenuzado y removido, y a ser transportado, factores pasivos de la erosión (González del Tánago, M., 1991).

2.3. FACTOR K

El Factor K representa la erodabilidad o vulnerabilidad del suelo a la erosión, depende básicamente de la textura, del contenido de materia orgánica y de la permeabilidad del suelo (Wischmeier & Smith, 1978). El factor K representa la pérdida anual media de suelo por unidad del factor R, en las condiciones normalizadas para las parcelas estándar (22,13 m de longitud y 9% de pendiente), (Wischmeier, WH et al., 1971). En general, cuando la textura del suelo tiene alto porcentaje de limos se disminuye la resistencia a la erosión, y cuando el porcentaje de arcillas es alto, el suelo aumenta su cohesión logrando mayor resistencia al proceso de la erosión; en el caso de suelos con alto contenido de arenas, la permeabilidad es un factor que favorece la resistencia a la pérdida del suelo, en cuanto a la estructura y la permeabilidad de los suelos también inciden en la vulnerabilidad del suelo a ser erosionado.

La erodabilidad del suelo o factor K, es una descripción cuantitativa que indica la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, es considerado como el factor más importante para la predicción de la erosión y refleja el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferente tasa cuando los demás factores que afectan la erosión son los mismos (Ramírez et al., 2009).

El valor del factor K se obtiene tradicionalmente por medición directa en campo durante un periodo de un año, a partir de pérdidas ocasionadas por las lluvias en condiciones normalizadas establecidas para las parcelas tipo USLE, indicando su valor las pérdidas anuales medias de suelo por unidad del factor R. En la práctica, para la estimación en gabinete, su valor se determina a partir de un nomograma desarrollado por Wischmeier y Smith a partir de datos experimentales (Ibañez A., S. et al, 2007).

Es muy importante tener claro que la aplicación de la metodología USLE en una cuenca hidrográfica, presenta mayor complejidad y alcances en la determinación de los parámetros que componen la Ecuación Universal de Suelos, aparecen situaciones que trascienden las evaluaciones en pequeñas parcelas, por lo tanto, en la medida de que se disponga mayor densidad de información de campo geo-referenciada, se espera que los resultados sean representativos y coherentes con la realidad.

2.4. FACTOR LS

El factor topográfico L.S es de alta importancia en la generación de sedimentos, representa la influencia de las fuerzas gravitacionales sobre una masa de suelo superficial, existe una relación directa entre la erosión y la pendiente, al aumentar la inclinación y la longitud de la pendiente, se traduce en el incremento de la velocidad y del volumen de escorrentía superficial, esto conlleva al arrastre de sedimentos.

Los modelos de elevación digital o DEMs proveen un modelo de representación continua de la superficie de la tierra. Esta forma de información espacial brinda un modelo de “realidades” que puede contener desviaciones o errores. La naturaleza y extensión de estos errores son muchas veces desconocidos y no están realmente disponibles para los usuarios que manejan información espacial (Weshler, 2006). El modelado espacial, por lo tanto, logra solo a veces un éxito limitado, debido a la calidad de los datos de la fuente (Cruz G., M., 2008).

En general, todos los modelos de erosión dependen en gran medida de la precisión en la estimación de pendiente para los cálculos de la erosión. En el caso de los SIG, estos pueden extraer ángulos de pendiente desde un modelo de elevación digital usando los denominados algoritmos de pendiente, con ventajas en la estimación automática de los ángulos de pendiente.

En materia de erosión hídrica, muchos trabajos de investigación demuestran que los aumentos en longitud e inclinación de pendiente pueden producir altas velocidades de flujo superficial y por tanto mayores tasas de erosión (Hann et al., 1994). La erosión en suelos de textura gruesa es considerablemente más sensible a los cambios en la inclinación de la pendiente que los cambios en longitud de pendiente (McColl et al., 1997).

Se han desarrollado diferentes metodologías para la estimación del factor LS mediante la utilización de un SIG, y la diferencia principal entre estos, radica en la forma de estimar la longitud de la pendiente, el cual se definió originalmente, como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto donde la pendiente decrece lo suficiente como para que la deposición comience, o bien, el flujo se concentre en un canal definido (Wischmeier y Smith, 1978).

La tecnología SIG actual permite una fácil construcción y manejo de Modelos de Elevación Digital (DEMs), los cuales permiten, en principio, la estimación de los parámetros LS y del área de contribución, y puede ser representada aún en topografías complejas.

2.5. FACTOR C

El Factor C de cobertura vegetal representa la efectividad de las plantas como cubierta protectora del suelo frente a la energía de impacto de las gotas de lluvia y a la fuerza del flujo superficial. Su valor expresa la relación que existe entre las pérdidas de suelo anuales de una parcela o superficie con una determinada vegetación y las pérdidas que esa misma parcela tendría en condiciones de barbecho (desnudo) continuado y laboreo según máxima pendiente (Ibáñez A. et al, 2003).

Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo; mientras que los componentes subterráneos, como los sistemas radiculares, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Roy Morgan, 1997).

La cobertura vegetal controla la energía con que llegan las gotas de agua al suelo y la velocidad de la escorrentía superficial, se trata de una protección natural, entre más densa la cobertura boscosa se favorecerá la resistencia a la erosión.

En zonas cultivadas, la asignación del factor C debe realizarse con base en las prácticas agronómicas de la zona de estudio, el grado de protección ejercido por la vegetación varía a lo largo del año, tanto en función del ciclo vegetativo como de las labores agrícolas. En ambientes forestales, zonas de pasto o áreas de matorral adquieren gran importancia otros aspectos, como la altura de la copa o variaciones climáticas en la producción de hojarasca u otro tipo de residuo (Ibáñez A. et al, 2003).

2.6. FACTOR P

El factor P representa las prácticas de conservación del suelo, un manejo inadecuado representa un factor erosivo de alta importancia; en el modelo USLE el factor P representa la influencia de las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión. Las buenas prácticas agrícolas y pecuarias, y el laboreo racional de los suelos minimizan los procesos erosivos. Se trata de interceptar la escorrentía mediante prácticas culturales, con vegetación sembrada en curvas de nivel, en fajas o en terrazas. El factor P es la relación entre la erosión que ocurre con una determinada práctica de cultivo y la que ocurre con la condición estándar de laboreo a favor de la pendiente, y teniendo en cuenta que los demás factores permanecen iguales. En plantaciones forestales el factor P se considera unitario.

El factor P se concibe como la relación de pérdida de suelo con prácticas de soporte a la pérdida correspondiente con labranza en pendiente, la cual tiene un valor de 1. El factor P se refiere a prácticas de control de la erosión y se considera como una variable independiente y, por tanto, no incluido en el factor C, siempre y cuando se trate de prácticas de conservación con cultivos a nivel, en fajas y en terrazas (Morales A., M.C., 2014).

De acuerdo con la guía del usuario de la USLE (1993) citado por Antezana (2001), el factor P es función de la pendiente del terreno y de las prácticas de conservación de suelos; se pueden destacar algunas prácticas de conservación agronómicas como rotaciones de acuerdo a un calendario, cultivos en curvas a nivel, evitar monocultivos en grandes extensiones y cultivos asociados; también se incluyen prácticas de conservación hidráulicas, tales como barreras rompe vientos, muros de piedra, terrazas, canales en contorno y cultivos asociados en zanja de infiltración.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Modelar la erosión hídrica y el efecto de la cobertura vegetal en el aporte de sedimentos en el canal interceptor del Distrito de Riego Roldanillo – La Unión – Toro.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar la pérdida de suelo, potencial y real, por erosión hídrica en algunas áreas de drenaje tributarias al canal interceptor del Distrito de Riego RUT, a través de un sistema de información geográfico y mediante análisis espacial.
- Analizar el comportamiento de la erosión en algunas áreas de drenaje tributarias al canal interceptor del Distrito de Riego RUT.
- Evaluar la efectividad de la cubierta vegetal en el control de la degradación del suelo por causa de la lluvia.

4. METODOLOGÍA

4.1. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca RUT se localiza en el suroeste de Colombia, en la falda oriental de la cordillera Occidental, al norte del Departamento del Valle del Cauca. En el extremo sur de la cuenca RUT se ubica la zona de estudio, la cual está conformada por las áreas de drenaje de las Quebradas Cáceres y Roldanillo, Quebrada El Rey, Quebrada Zanjón Hondo, Quebrada Santa Rita - Higeroncito, Zanjón Tinlinton y Zanjón La Culebrera (Figura 1).

El área de drenaje de la cuenca RUT es de 43,625.67 ha, de las cuales, la zona de estudio comprende un área de 14,072.36 ha; esta proporción de áreas equivale a un 32.25% del área total. El canal interceptor del RUT tiene una longitud de 32 Km + 072 m y el tramo de canal interceptor asociado a la zona de estudio alcanza una longitud de 20 km + 760 m.

Es importante mencionar que los mayores problemas de sedimentación en el canal interceptor ocurren en los primeros 5 km de su recorrido inicial, se trata de un tramo considerado crítico por la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego (ASORUT), de manera que el análisis de producción de sedimentos se enfoca principalmente en las aportaciones de las quebradas Cáceres y Roldanillo, Quebrada El Rey, Quebrada Zanjón Hondo, Quebrada Santa Rita - Higeroncito, Zanjón Tinlinton, además de otras corrientes de corta longitud que tributan sus caudales sólidos y líquidos al canal interceptor.

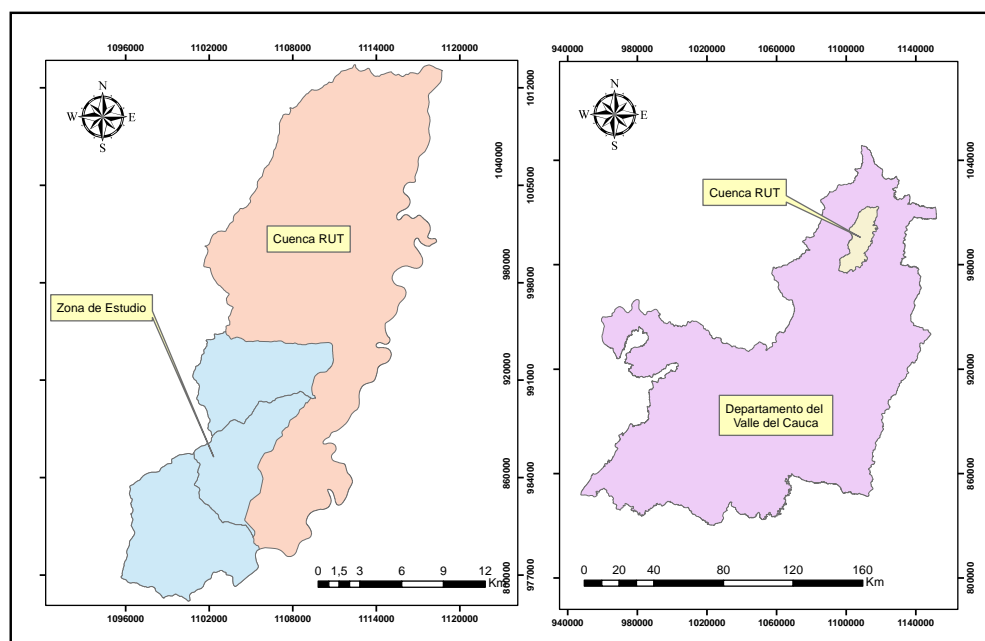


Figura 1. Localización cuenca RUT y zona de Estudio.

4.2. ENFOQUE METODOLÓGICO

La estructura metodológica del presente trabajo encuentra explicación, amplia y suficiente, en el esquema conceptual de la Figura 2, se trata de un procedimiento en donde cada uno de los factores que conforman la ecuación universal de pérdida de suelos está representado por un mapa georreferenciado, con rangos de escala previamente definidos según estándares adoptados de la literatura científica.

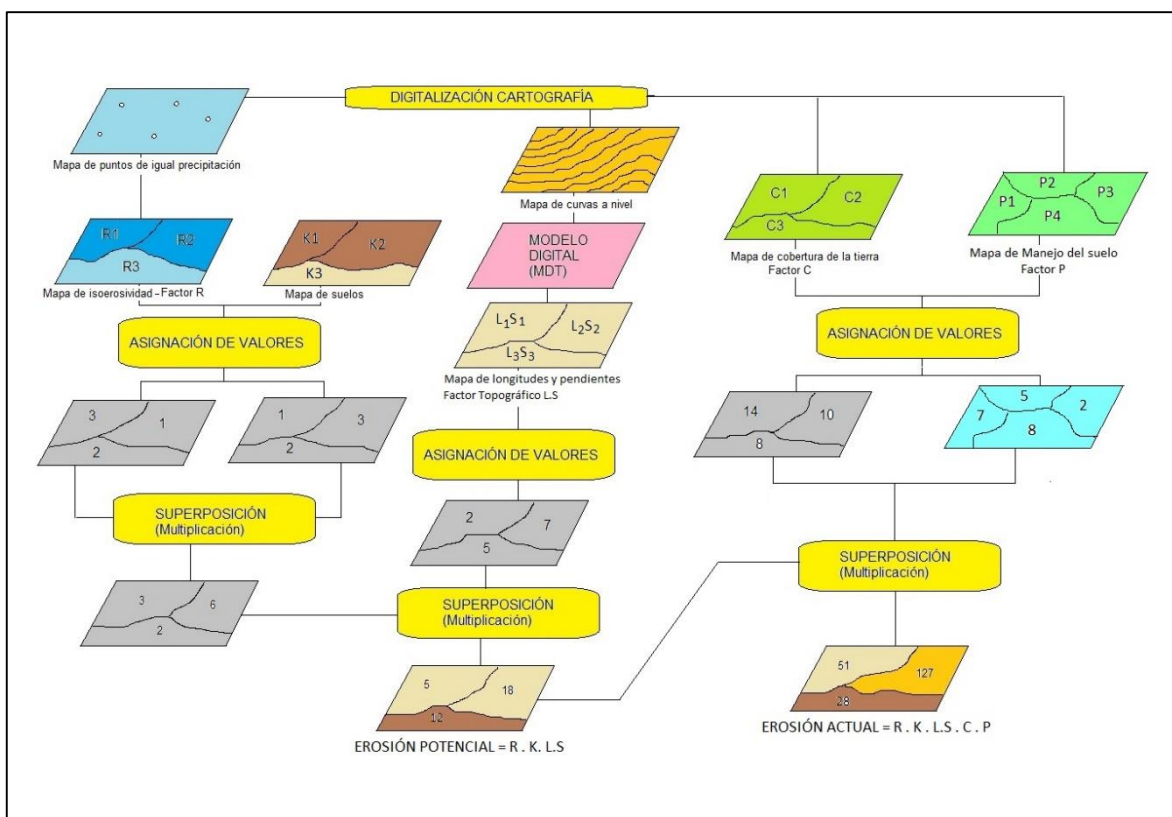


Figura 2. Modelamiento para la determinación de la erosión actual y potencial – Metodología USLE mediante un SIG

(Adaptado: Cortolima, 2005)

En primera aplicación, se superponen los mapas temáticos de los factores lluvia (erosividad) y suelo (erodabilidad); el siguiente paso consiste en multiplicar el resultado anterior con el factor topográfico (pendiente y longitud) para dar lugar al mapa de erosión potencial; para completar la evaluación, se parte del mapa de cobertura del suelo, el cual se superpone con el mapa de erosión potencial, esta operación permite encontrar el mapa de erosión actual.

Un último factor a considerar podría ser el mapa de manejo de suelos, pero esta opción únicamente es aplicable en zonas en donde se desarrollen programas de manejo de suelos; los factores de cobertura vegetal y de manejo de suelos sin duda contribuyen a mitigar los procesos de degradación de suelos, sin embargo, en el presente trabajo sólo se dispone

de información de cobertura vegetal. En todo el proceso fue necesario el uso del software ArcGis 10.3. La estructura metodológica sigue el orden de determinación de cada uno de los factores que conforman la ecuación universal de pérdida de suelos.

4.2.1. Procedimiento para estimar el Factor de erosividad de la lluvia R.

En la ecuación universal de pérdida de suelos, el primer factor a determinar corresponde a la acción de la lluvia sobre la superficie del suelo, se conoce como el factor R (Rain) y representa el poder de la lluvia para erosionar el suelo, equivale al total de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos para todos los eventos de lluvias erosivas en un área durante un año en promedio. En principio no se consideran lluvias erosivas aquellas menores a 13 mm de agua precipitada, separada por al menos 6 horas del evento anterior o posterior, a no ser que caigan más de 6 mm en 15 minutos (Wischmeier and Smith, 1978).

Los mejores resultados para calcular el factor R, se obtienen cuando se dispone de varias estaciones pluviográficas y por lo menos 10 años de registros, sin embargo esta condición es muy difícil de encontrar en el contexto colombiano. En el caso específico se consideró la información de dos estaciones pluviográficas, la Estación ISUGU y la estación Centro Administrativo del RUT, la primera de ellas presenta registros continuos y de aceptable calidad, mientras que la segunda estación, no se tomó en cuenta en el análisis, por recomendación directa de la Coordinación del Centro Operativo 09 del IDEAM, debido a la disponibilidad y discontinuidad de los registros, razón por la cual sólo se trabajó con la información de la Estación ISUGU. En la Tabla 1 se presenta un resumen de la información hidroclimatológica correspondiente a la red de estaciones consultadas.

Tabla 1. Información hidroclimatológica (red de estaciones)

ESTACIÓN	CUENCA	MUNICIPIO	COORDENADAS		ALTURA msnm	CATEG.	ENTIDAD
			ESTE	OESTE			
La Despensa	Rut	La Unión	1103282.81	990594.89	1342	PM	CVC
El Lucero	Rut	La Unión	1107427.86	990958.72	976	PM	CVC
Buenavista	Rut	Roldanillo	1101953.88	986244.13	1628	PM	CVC
El Porvenir	Rut	La Unión	1106652.29	994155.50	996	PM	CVC
Sabanazo	Garrapatas	La Unión	1103028.53	994446.77	1643	EV	CVC
El Aguacate	RUT	Roldanillo	1097307.64	977785.60	1394	PM	CVC
Montecristo	RUT	Roldanillo	1098279.01	980253.32	1325	PM	CVC
El Orégano	RUT	Roldanillo	1100211.48	984030.31	1358	PM	CVC
Isugu	RUT	Roldanillo	1108443.00	980499.53	908	PG	IDEAM

La distribución espacial de la red de estaciones pluviométricas operadas por la CVC y la estación pluviográfica administrada por el IDEAM se ilustran en la Figura 3.

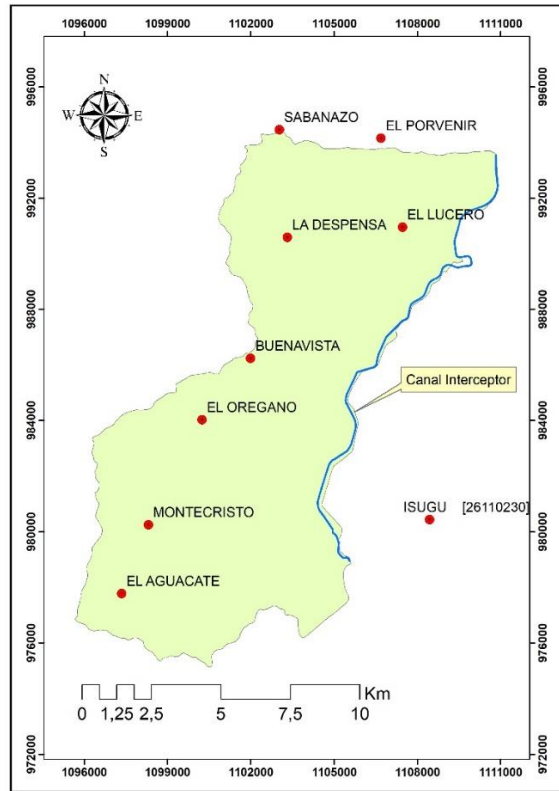


Figura 3. Red de estaciones pluviométricas de la CVC y Pluviográfica del IDEAM.

La estimación de R se realizó a través de métodos directos e indirectos; el primer método se aplica en áreas que cuenten con información pluviográfica, mientras que el segundo método se aplica en áreas que dispongan sólo de información pluviométrica. En el método indirecto, se trata de establecer correlaciones sobre la base de precipitaciones diarias, mensuales o máximos valores, en nuestro caso los resultados se relacionarán con datos de precipitación medias mensuales.

- Método Directo

Se basa en la lectura de las curvas de masa de las lluvias, bandas pluviográficas, y se calcula el factor R , parámetro que representa un valor promedio del índice de erosividad de las lluvias EI , se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\sum_{i=1}^{ne} (E * I30)_i) \quad (2)$$

Donde:

E : energía cinética de la lluvia.

$I30$: máxima intensidad en 30 minutos durante un evento de lluvia.

ne : número de eventos de lluvia ocurridos en el año.

n : número de años de registro.

- Cálculo del índice de erosividad (EI) de la lluvia

Para cada lluvia, se definieron periodos de intensidad uniforme, y para cada intensidad se tiene asociada su correspondiente energía cinética, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E = 0.119 + 0.0873 \times \text{Log}(I_j) \quad (3) \quad \text{Para } I \leq 76 \text{ mm/h}$$

$$E = 0.283 \quad (4) \quad \text{Para } I > 76 \text{ mm/h}$$

Donde,

E = energía cinética unitaria de la lluvia, en ton x m/ha/mm de lluvia.

I = intensidad de la lluvia en mm/h.

El factor R se estimó para cada año sumando todos los índices de erosividad de la lluvia, EI, de todos los eventos del año, el procedimiento se repitió para todos los años disponibles y se obtuvo un valor promedio, el cual representa el factor R de la USLE. En el presente estudio se dispuso de 123 curvas de masas de lluvias erosivas correspondientes a cinco (5) años de registro, datos suministrados por el IDEAM, eventos seleccionados del periodo 2012 a 2016 pertenecientes a la estación pluviográfica ISUGU.

Cálculo de la energía total del intervalo de lluvia:

$$Es = e * \Delta p \quad (5)$$

Donde:

Es = energía cinética del intervalo de lluvia, en MJ/ha

e = energía cinética unitaria de la lluvia, en Mj/ha/mm

Δp = Lámina de lluvia en el intervalo de tiempo, en mm.

Cálculo de la energía de la lluvia total:

$$E = \sum_{j=1}^n (Es)_j \quad (6)$$

Donde:

E = energía cinética de la lluvia total, en Mj/ha

n = número de intervalos en que se divide la lluvia

Finalmente, se determinó la intensidad máxima de lluvia para una duración de 30 minutos, I30, y se calculó el índice EI de la lluvia.

$$EI = E * I30 \quad (7)$$

Donde:

EI = índice de erosividad de la lluvia, en (MJ mm)/ha.h).

- Método Indirecto

Como quiera que no se dispuso de pluviogramas en las cinco (5) estaciones pluviométricas influyentes, se hizo necesario recurrir a relaciones empíricas que permitieran generar la información para el cálculo del factor R. La literatura científica reporta trabajos que relacionan precipitaciones totales diarias, mensuales y máximas en 24 horas versus el factor R, para el presente caso se procedió a utilizar relaciones empíricas sobre la base de las precipitaciones totales medias mensuales multianuales.

Se plantearon relaciones estadísticas entre la estación ISUGU y cada una de las estaciones influyentes, se trata de observar características de comportamiento de la precipitación media mensual a través del análisis de regresión; para lo anterior se procedió a calcular con el siguiente indicador estadístico R^2 .

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad ; \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (8)$$

Donde,

R^2 = indicador estadístico

e = error aleatorio

y_i = valor de precipitación

\bar{y} = valor medio de la precipitación

Con el coeficiente R^2 fue posible establecer la proporción de la variabilidad de Y que es posible explicar a través del modelo planteado. Valores cercanos a 1 implican que la mayor parte de la variabilidad de Y está explicada por el modelo de regresión, por lo tanto, el modelo parece estar bien ajustado.

A partir de los valores del factor R y de los valores de precipitación de la estación ISUGU, se evaluaron diferentes tipos de función, a saber: lineal, exponencial, logarítmica, polinómica, tratando de encontrar la función de mejor ajuste a la nube de puntos. A continuación, para cada una de las estaciones influyentes, se aplicó la función de mejor ajuste y se generaron los valores totales mensuales del factor R.

Con base en los valores obtenidos del factor de erosividad R, se procedió con la ayuda de la herramienta de trabajo Arc-Gis, a preparar y generar las curvas Iso - R o Isoerodental a nivel anual.

4.2.2. Procedimiento para estimar el Factor de erosionabilidad del suelo K.

El factor K depende en gran medida de la profundidad y textura de los suelos, también de la permeabilidad y del contenido de materia orgánica en cada una de las unidades de suelos; sobre éste último factor, si solo se dispone de información de textura, para determinar el contenido de la materia orgánica existen diversas fórmulas propuestas, entre las que se destaca el denominado factor de Van Bemmelen.

$$M.O. \% = \% C * \text{Factor de contenido de carbono} \quad (9)$$

Donde,

M.O. % = contenido de materia orgánica

%C = porcentaje de carbono

Factor de contenido de carbono = 1.724 (adimensional)

Respecto a su fundamento científico, existen investigaciones que de alguna manera cuestionan que el 58% de la materia orgánica es carbono ($100/58 = 1.724$), e insisten en la necesidad de ajustar el factor en función de otros parámetros físicos y químicos del suelo. No obstante lo anterior, la corrección por un coeficiente que asume que la materia orgánica contiene sólo ácidos húmicos con un 58% de carbono, finalmente es una estimación que puede utilizarse en ausencia de información de un análisis de laboratorio detallado o semidetallado de las unidades de suelos.

A partir de los trabajos cartográficos y de levantamiento de suelos realizados por la CVC, planos temáticos georreferenciados, Tablas de atributos de los suelos, se identifican y se leen las correspondientes características de los suelos que conforman las áreas de interés para la determinación del factor K. Entre los componentes a determinar se encuentran la unidad cartográfica de suelos, el porcentaje de perfil, la profundidad, la clase de textura y el porcentaje de materia orgánica. Se organiza la información y se procede a estimar el factor K.

En caso de resultar unidades cartográficas sin información sobre porcentajes de materia orgánica, se procede a utilizar la Tabla de conversión de valores de textura y porcentaje de materia orgánica, propuesta por Kirkby y Morgan, 1980. Con datos de la textura de los suelos y contenido de materia orgánica, se estima el valor de erosionabilidad K (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de K asociados a textura y Materia orgánica, según Kirkby y Morgan, 1980.

Textura del suelo	Contenido de Materia orgánica		
	< 0.5%	0.5% a 4%	>4%
Arcilla	0.017	0.038	-----
Arcilla arenosa	0.018	0.017	0.016
Arcilla limosa	0.033	0.030	0.025
Arena	0.007	0.004	0.003
Arena fina	0.0021	0.018	0.013
Arena fina franca	0.032	0.026	0.021
Arena franca	0.016	0.013	0.011
Arena muy fina	0.055	0.047	0.037
Arena muy fina franca	0.058	0.050	0.040
Franco (grada)	0.050	0.045	0.038
Franco arcillolimoso	0.049	0.042	0.034
Franco arcilloso	0.037	0.033	0.028
Franco arenoarcilloso	0.036	0.033	0.028
Franco arenoso	0.036	0.032	0.025
Franco arenoso fino	0.046	0.040	0.032
Franco arenoso muy fino	0.062	0.054	0.043
Limo	0.079	0.068	0.055
Limo franco	0.063	0.055	0.043

Fuente: Kirkby y Morgan, 1980.

La estimación de los factores de erosionabilidad del suelo, se realiza mediante el geoproceto de la información anterior, herramienta del SIG la cual permite obtener el plano

de isovalores de K. La superposición de los planos de isoerodentas y el plano de isovalores de K, con la correspondiente asignación de valores de peso, permitirán encontrar un plano temático en el cual se combinan los primeros factores R y K.

4.2.3. Procedimiento para estimar el factor topográfico L.S.

En principio el factor topográfico LS es la relación entre el suelo perdido en una superficie cualquiera con pendiente S y longitud λ , también se relaciona a una superficie piloto asociada al modelo USLE. El factor topográfico LS ha sido objeto de numerosos estudios a través del tiempo. El factor USLE se desarrolló originalmente a partir de parcelas de erosión de menos de 122 m de longitud sobre un suelo agrícola, sin disturbios, de textura media, con pendientes que variaban de 3% a 18% bajo condiciones de campo y precipitación natural (McCool *et al.*, 1987).

Wischmeier y Smith (1978), modificaron la ecuación original propuesta por ellos mismos en U.S.D.A., en Agriculture Handbook 282, que detalló por primera vez el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). Los autores mencionados se basaron en los datos de pérdida de suelo recolectados en sitios bajo cosecha en La Fayette, Wisconsin (USA), para reducir el efecto del factor de inclinación de pendiente S, expresado en función del seno θ , en la pérdida de suelo (Cruz Giménez S., M. 2008).

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m (65.41 \text{sen}^2 \theta + 4.56 \text{sen} \theta + 0.0654) \quad (10)$$

Donde, LS, es el factor de longitud e inclinación de pendiente relativo a una parcela de 22.13 m de longitud sobre una pendiente uniforme de 9%, o sea, exactamente, $\text{sen} \theta = 0.0896$ o $\theta = 5.143^\circ$; λ longitud horizontal de la pendiente (m). La longitud de pendiente, λ , fue definida como la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto donde, o bien el gradiente de pendiente decrece lo suficiente como para que la deposición comience, o bien, el flujo sea concentrado en un canal definido (Wischmeier y Smith, 1965).

Los parámetros θ y m, definidos anteriormente, donde $m = 0.5$ para $S > 5\%$; $m = 0.4$ para $3\% < S \leq 5\%$; $m = 0.3$ para $1\% < S \leq 3\%$; y $m = 0.2$ para $S \leq 1\%$. La ecuación 10 es la forma para el factor de LS que fue usada en el Agricultural Handbook 537 (Wischmeier y Smith, 1978).

Para el caso de cuencas hidrográficas, McCool *et al.* (1987 y 1989), para el cálculo de LS proponen la siguiente formulación:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} \quad (11)$$

$$\beta = \left[\frac{\left(\frac{\text{Sen} \theta}{0.00896} \right)}{3.0 \times (\text{Sen} \theta)^{0.8} + 0.56} \right] \times r \quad (12)$$

$$S = 16.8 \text{ Sen} \theta - 0.50 \quad \text{caso pendiente} \geq 9\% \quad (13)$$

$$S = 10.8 \text{ Sen} \theta + 0.03 \quad \text{caso pendiente} < 9\% \quad (14)$$

Donde:

L = Factor de longitud del terreno (adimensional)

λ = Longitud del terreno, en m.

β = Relación erosión en surco a erosión entre surco.

θ = Ángulo de inclinación del terreno

r = Coeficiente igual a 0.5 en tierras forestales o pastizales; 1 en terrenos agrícolas y 2.0 en sitios en construcción.

S = Factor de pendiente de la superficie (adimensional).

En 1982 se realizó la última revisión del factor de laderas más o menos uniformes, resultando las siguientes expresiones (Onrubia, 2001).

- Para pendientes, $S \leq 20\%$ y longitud de pendiente, $\lambda < 350$ m

$$LS = \lambda^{0.5}(0.0138 + 0.00965s + 0.00138s^2) \quad (15)$$

- Para pendientes, $S > 20\%$ y longitud de pendiente, $\lambda < 350$ m

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{9}\right)^{1.4} \quad (16)$$

- Para pendientes, $S \leq 9\%$ y longitud de pendiente, $\lambda > 350$ m

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^{0.3} \left(\frac{0.43+0.3s+0.043s^2}{6.613}\right) \quad (17)$$

- Para pendientes, $S > 9\%$ y longitud de pendiente, $\lambda > 350$ m

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^{0.3} \left(\frac{s}{9}\right)^{1.3} \quad (18)$$

Para la aplicación de las ecuaciones 15 a 18, el parámetro (λ) se trabaja en metros y la pendiente (s) en porcentaje. Las ecuaciones 15 a 18, son estrictamente aplicables en el caso de laderas con pendiente uniforme y con un mismo tipo de suelo y vegetación, en toda su longitud, debiendo utilizarse factores correctores para el caso en que a lo largo del recorrido de la lámina de escurrimiento se produzcan cambios sensibles de pendiente o de algunos de los otros factores (Cruz Giménez S., M. 2008).

La Figura 4 representa la forma de cálculo del efecto de la pendiente o Factor topográfico, propuesto originalmente por Wischmeier et al (1978). Los valores del Factor Topográfico LS para combinaciones específicas de longitud de pendiente e inclinación, también están representados en la Tabla 3, valores propuestos por los mismos autores antes mencionados.

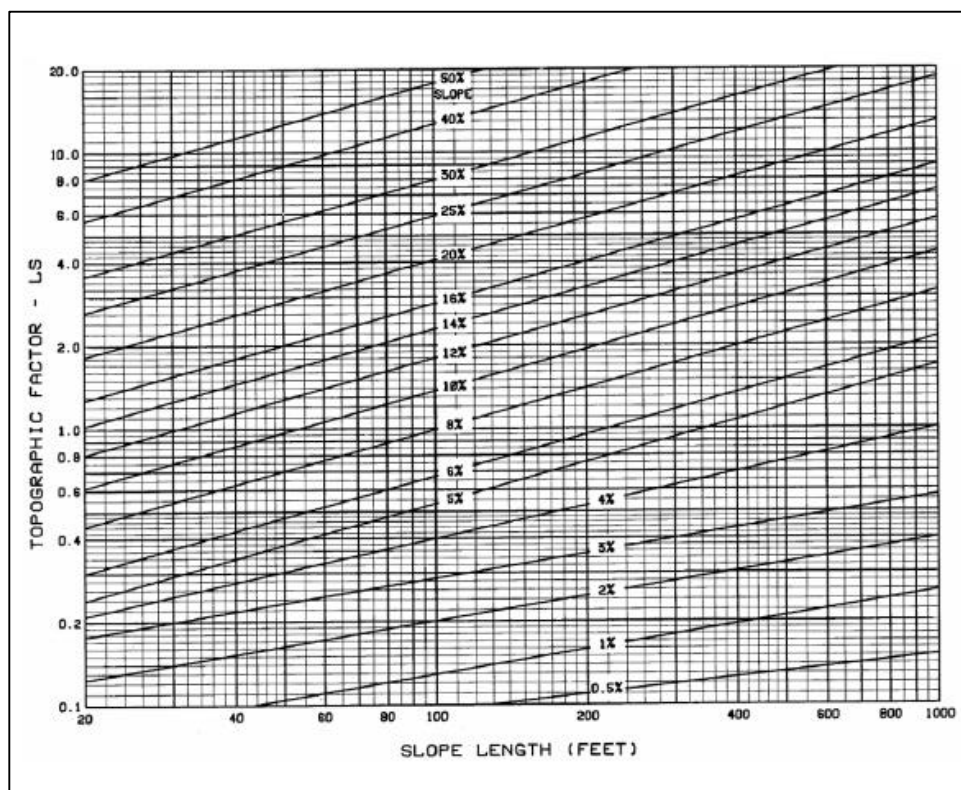


Figura 4. Factor topográfico LS – efecto de la pendiente
(Fuente: Wischmeier et. al., 1978)

Tabla 3. Valores del factor topográfico LS, para combinaciones específicas de longitud de pendiente e inclinación.

Pendiente Porcentaje	Longitud de pendiente (pies)											
	25	50	75	100	150	200	300	400	500	600	800	1000
0.2	0.060	0.069	0.075	0.080	0.086	0.092	0.099	0.105	0.110	0.114	0.121	0.126
0.5	0.073	0.083	0.090	0.096	0.104	0.110	0.119	0.126	0.132	0.137	0.145	0.152
0.8	0.086	0.098	0.107	0.113	0.123	0.130	0.141	0.149	0.156	0.162	0.171	0.179
2	0.133	0.163	0.185	0.201	0.227	0.248	0.280	0.305	0.326	0.344	0.376	0.402
3	0.190	0.233	0.264	0.287	0.325	0.354	0.400	0.437	0.466	0.492	0.536	0.573
4	0.230	0.303	0.357	0.400	0.471	0.528	0.621	0.697	0.762	0.82	0.92	1.01
5	0.268	0.379	0.464	0.536	0.656	0.758	0.928	1.07	1.20	1.31	1.52	1.69
6	0.336	0.476	0.583	0.673	0.824	0.952	1.17	1.35	1.50	1.65	1.90	2.13
8	0.496	0.701	0.859	0.992	1.21	1.41	1.72	1.98	2.22	2.43	2.81	3.14
10	0.685	0.968	1.19	1.37	1.68	1.94	2.37	2.74	3.06	3.36	3.87	4.33
12	0.903	1.28	1.56	1.80	2.21	2.55	3.13	3.61	4.04	4.42	5.11	5.71
14	1.15	1.62	1.99	2.30	2.81	3.25	3.98	4.59	5.13	5.62	6.49	7.26
16	1.42	2.01	2.46	2.84	3.48	4.01	4.92	5.68	6.35	6.95	8.03	8.98
18	1.72	2.43	2.97	3.43	4.21	3.86	5.95	6.87	7.68	8.41	9.71	10.90
20	2.04	2.88	3.53	4.08	5.00	5.77	7.07	8.16	9.12	10.00	11.50	12.90

Fuente: Wischmeier et al. 1978.

En materia topográfica, la CVC cuenta con información georreferenciada y actualizada de toda su jurisdicción, dispone de un modelo de elevación digital de terreno, plano general facilitado por la Corporación y que será procesado con la extensión 3D Analyst de ArcGis 10 o Spatial Analyst para derivar el mapa temático de la zona de estudio en un raster de pendientes. En principio se conoce en un SIG que un mapa de pendientes permite identificar la diferencia del gradiente entre dos formas de relieve, es decir es una relación entre la distancia horizontal y la altitud entre dos puntos.

El siguiente paso consiste en definir rangos de pendientes con su respectiva clasificación, determinar el tamaño de las áreas y los porcentajes de área correspondientes. Los rangos de pendiente y su clasificación se definen en la Tabla 4.

Tabla 4. Rango de pendientes y clasificación

Rango	Clasificación
0 – 3	Muy Plano
3 – 7	Plano
7 – 12	Casi Plano
12 – 25	Ondulado
25 – 50	Muy Ondulado
50 – 75	Escarpado
>75	Muy Escarpado

A partir del mapa temático de pendientes y de valores asignados, se realiza la superposición, multiplicación de valores, en combinación con los planos de Iso R e Iso K, el resultado será la obtención del plano de Erosión potencial.

4.2.4. Procedimiento para estimar el factor de cobertura vegetal C

Se trata de asignar a la cobertura vegetal un coeficiente que refleje su mayor o menor capacidad de frenar la acción erosiva del agua. En todos los casos siempre es necesario utilizar Tablas validadas para las condiciones específicas de vegetación y manejo de la zona de estudio. Para estimar el factor C se consideran en principio condiciones de coberturas permanentes y coberturas en tierras agrícolas.

4.2.4.1. Determinación del factor C en coberturas permanentes o leñosas

La determinación del factor C en coberturas leñosas o de protección permanente, implica disponer de información de porcentaje de suelo desnudo, matriz de raíces finas de los árboles y reconsolidación del suelo, en los primeros 3 cm de suelos no labrados; un segundo factor se refiere al porcentaje del suelo desnudo con cobertura del dosel, altura del dosel, adicionalmente si se cuenta con cobertura boscosa fuerte, se considera un factor adicional denominado alto contenido orgánico (Dissmeyer y Foster, 1982).

Información de campo de los factores antes mencionados no se encuentran disponibles, de manera que se recurre a la metodología formulada por Robredo Sánchez, J.C., (2007), Tabla 5, la cual presenta valores medios del factor de cultivo y/o vegetación, publicados por el Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad Politécnica de Madrid.

Tabla 5. Valores medios del factor cultivo y/o vegetación C (Robredo, J.S., 2007)

Características de la cubierta vegetal		Factor C
Arbolado denso	Bosque natural o monte alto ordenado procedente de repoblación en estado fustal, perfectamente conservado y cubriendo totalmente el suelo.	0,001
	Bosque cubriendo el suelo al menos en un 70%, sotobosque bien conservado, tapizando por completo al suelo, con abundancia de especies de etapas climáticas regresivas.	0,002 – 0,010
	Bosque cubriendo el suelo en un 70%, sotobosque algo degradado, formado por especies poco encespedantes o de etapas climáticas regresivas.	0,020 – 0,050
	Repoblado joven, en buen estado, pero aún con escaso desarrollo.	0,060 – 0,100
Arbolado claro	Bosque con una cubierta aérea menor del 70% y sotobosque bien conservado, tapizando plenamente al suelo y con abundancia de especies de etapas climáticas evolucionadas.	0,010 – 0,030
	Bosque con una cubierta entre el 70% y el 50%; sotobosque escaso o de especies poco encespedantes y etapas climáticas regresivas.	0,040 – 0,080
	Bosque con una cubierta aérea menor del 50%; sotobosque degradado, dejando claros, con especies poco encespedantes y de etapas climáticas regresivas.	0,080 – 0,100
Matorral denso	Cubriendo totalmente el suelo y perfectamente conservado, abundancia de especies de gran porte de los primeros estadios no arbóreos de la facies climática.	0,002 – 0,010
	Cubriendo al menos en un 70% el suelo, abundancia de especies de los primeros estadios no arbóreos de la facies climática; la cubierta herbácea se conserva, al menos estacionalmente.	0,060 – 0,100
	Cubriendo totalmente el suelo pero con especies regresivas, poco encespedantes y de escaso porte, el caso de matorrales formados prácticamente solo por jarales (gén. Cistus).	0,100 – 0,200
Matorral claro	Cubriendo al suelo en un 50%, con especies climáticamente regresivas, de escaso porte y/o poco encespedantes.	0,200 – 0,250
	Eriales y cultivos abandonados.	0,200 – 0,400
Pastizales	Praderas bien cuidadas.	0,030 – 0,080
	Pastizales bien conservados.	0,060 – 0,100
	Pastizales degradados.	0,100 – 0,250
Cultivos secano	Cultivos arbóreos y viñedos.	0,400 – 0,500
	Cultivos herbáceos, básicamente anuales.	0,250 – 0,300
	Cultivos densos de alta productividad.	0,150 – 0,200
Cultivos en regadío	Regadíos bien planificados y cultivados.	0,050 – 0,100
	Regadíos ocasionales poco planificados.	0,100 – 0,150
Improductivo		-----

4.2.4.2. Determinación del factor C en tierras agrícolas

En principio el factor C para tierras agrícolas se obtiene de acuerdo a la rotación de cultivos y en función de la distribución anual de la erosividad de la lluvia. En el presente trabajo se adoptan los valores del factor C propuestos por Delgado y Vásquez, (1997), y revisados por Cortolima en 2005.

Para determinar el factor C se tiene en cuenta el área de influencia de cada estación influyente de precipitación, se determina mediante ponderación de los valores de C correspondientes a las diferentes formaciones vegetales, según uso actual y en función del área relativa que ocupa cada formación vegetal. El procedimiento continúa para todas las combinaciones de coberturas presentes en la zona de estudio, tanto para consociaciones y asociaciones. La Tabla 6 ilustra valores del Factor C para diferentes tipos de cultivos.

Tabla 6. Valores de C para diferentes cultivos

CULTIVO	FACTOR C	CULTIVO	FACTOR C
Suelo desnudo	1	Asociación maíz-yuca	0.235
Maíz (alta dens.)	0.415	Patilla - Melón	0.265
Frijol (baja dens.)	0.450	Bosque denso	0.001
Yuca	0.430	Maíz (Mod. Dens.)	0.530
Arroz	0.190	Sorgo (alta dens.)	0.405
Lechuga, Rep. Coliflor	0.545	Maní	0.575
Zanahoria	0.690	Tomate (solanáceas)	0.625
Cacao	0.180	Soya (alta dens.)	0.675
Asociación maíz-frijol	0.210	Piña	0.415
Cítricos	0.375	Cebolla, cebollón	0.330
Pasto denso	0.005	Plátanos, bananos	0.820
Maíz (baja dens.)	0.620	Café (sin sombra)	0.250
Sorgo (baja dens.)	0.555	Asoc. Maíz-yuca-frijol	0.180
Frijol (alta dens.)	0.400	Auyama	0.105
Soya (baja dens.)	0.460	Ajo	0.820
Tabaco	0.545	Café (con sombra)	0.090

Fuente: Delgado y Vásquez 1997 – (Cortolima 2005).

4.2.5. Determinación del factor de manejo de prácticas de conservación P

En general, las prácticas de conservación del suelo consisten en tratar de disminuir la longitud de recorrido de la pendiente de escorrentía y de disipar la energía con la cual fluye el agua, luego el factor P se refiere al porcentaje de pérdidas de suelo que presenta una superficie de tierra considerada frente a las que tendría sin la práctica de conservación. Wischmeier y Smith (1978) proponen valores del factor P en la Tabla 7.

Para el presente trabajo, el factor P puede estimarse modificando el valor de 1, asumiendo un valor adecuado para valorar las tasas de erosión de toda la superficie en estudio.

Tabla 7. Factor P para distintas prácticas de conservación de suelos (Wischmeier y Smith, 1979)

Pendiente %	Trabajos a nivel		Trabajo en fajas			Trabajos en terrazas (2)	
	Factor	Máxima longitud del declive (m)	Factor P (1)	Anchura de faja (m)	Máxima longitud de declive (m)	Desagües en canales encespedados	Desagüe subterráneo en contrapendiente
1 - 2	0.6	130	0.30 - 0.60	43	260	0.12	0.05
3 - 5	0.5	100	0.25 - 0.50	33	200	0.10	0.05
6 - 8	0.5	65	0.25 - 0.50	33	130	0.10	0.05
9 - 12	0.6	40	0.30 - 0.60	26	80	0.12	0.05
13 - 16	0.7	26	0.35 - 0.70	26	55	0.14	0.05
17 - 20	0.8	20	0.40 - 0.80	20	40	0.16	0.06
21 - 25	0.9	16	0.45 - 0.90	16	33	0.18	0.06

(1) Los valores dados de P dependen del tipo y duración de la rotación agrícola.

(2) Los valores dados de P incluyen la capacidad de retención de sedimentos dentro de la ladera y deben utilizarse para calcular la salida de sedimentos fuera de la misma o su contribución a la degradación específica de la cuenca a la que pertenece.

4.3. RED HÍDRICA Y CANAL INTERCEPTOR

La cuenca RUT posee un patrón de drenaje natural conformado en su mayoría por corrientes de corta longitud, y de escaso rendimiento hídrico por la influencia de la denominada precipitación orográfica, zona de sotavento, característica predominante de las cuencas tributarias del costado occidental del Valle geográfico del río Cauca; el patrón de drenaje natural es del tipo ramificado o dendrítico, altamente intervenido, con múltiples derivaciones de agua para consumo humano, agrícola e industrial, lo cual resulta en un balance hídrico deficitario para todos los aprovechamientos.

La demanda del recurso agua y suelo es progresiva y se encuentra bajo alta presión social, por lo tanto, los escurrimientos son prácticamente aprovechados en su totalidad; la cuenca RUT se caracteriza por la presencia de lluvias de baja intensidad, con escurrimientos relativamente moderados, por lo tanto, las aguas meteóricas o de precipitación directa sobre suelos de alta pendiente y poca cobertura vegetal, son las directamente responsables en el arrastre de sedimentos hacia el canal interceptor.

Para una comprensión del escenario natural de análisis, a continuación, se trata de modo general, algunos aspectos básicos de la red hídrica y del canal interceptor en la zona de estudio seleccionada (Figura 5).

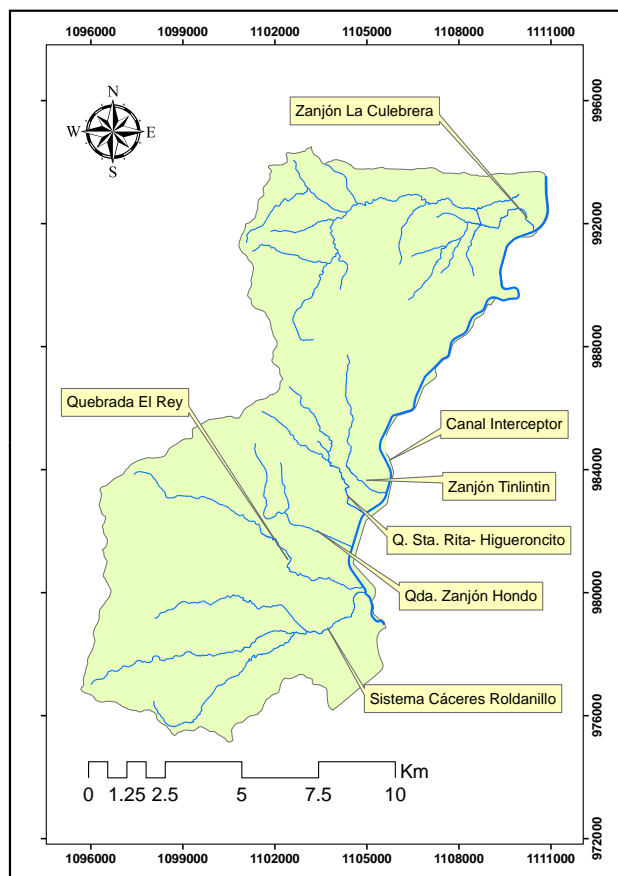


Figura 5. Sistema hídrico natural tributario al canal interceptor – zona de estudio.

4.3.1. Red hídrica y corrientes principales.

La red hídrica del tramo de cuenca seleccionada está conformada por numerosas quebradas, zanjones y acequias de derivación, el conjunto de corrientes forma parte de una red de drenaje tipo dendrítica, con muchas ramificaciones y diversas denominaciones, tanto técnicas como calificativos tradicionales. Todas las corrientes descienden en sentido occidente – oriente, son afluentes del río Cauca y pertenecen a la vertiente Atlántica.

Para efectos del análisis del sistema hídrico se procedió a identificar las principales corrientes tributarias al canal interceptor, las cuales por su características de cobertura e importancia en el drenaje, se relacionan a continuación en el sentido de tributación sur – norte, a saber, Quebradas Cáceres y Roldanillo, Quebrada El Rey, Quebrada Zanjón Hondo, Quebrada Santa Rita - Higuercito, Zanjón Tinlinton y Zanjón La Culebrera.

Otras corrientes tributarias al canal interceptor se caracterizan por su corto recorrido menor a 1 kilómetro y caudal reducido, el denominador común es el aprovechamiento total del

agua para abastecer entre 10 a 20 familias, éstas se consideran englobadas en el análisis geoespacial del territorio y también suman en materia de aportes de sedimentos.

4.3.2. Canal interceptor del Distrito de Riego RUT

Forma parte de la infraestructura de control de inundaciones, de riego y drenaje, tiene 32 km + 400 m de longitud medidos desde su desembocadura al río Cauca hasta la entrega de aguas del río Roldanillo, originalmente fue proyectado para interceptar las aguas de escorrentía provenientes del costado derecho de la cordillera occidental, pero su función operativa cambió por cumplir también la función de canal de riego (Figura 6).

El canal interceptor presenta variaciones en la sección transversal y el perfil longitudinal de fondo como consecuencia de prácticas inapropiadas de mantenimiento con maquinaria (Dragas y Volquetas); pérdida de capacidad de conducción por crecimiento de vegetación, deposición de sedimentos en suspensión y acarreo de sedimentos desde cuencas aledañas, y vertimiento de residuos por parte usuarios (basuras); altos costos de mantenimiento y conservación; deterioro de estructuras hidráulicas de control y regulación; y baja calidad de agua para riego por contaminación de aguas residuales (Urrutia C., N. et. al., 2006).

La presión de nuevos usuarios de riego asentados en la zona occidental del distrito, y la no continuidad del denominado canal 1.0 de riego, que quedó inconcluso por oposición de un sector de la comunidad, además del surgimiento de estructuras de control de nivel, son factores que contribuyen a agudizar el deterioro ambiental del canal interceptor; resulta entonces un conflicto técnico, económico y social que limita el manejo sostenible del distrito.

Para efectos de la presente evaluación del aporte de sedimentos al canal interceptor, y en razón al tamaño del área de la cuenca RUT, se seleccionó un tramo de interés comprendido entre la descarga de las quebradas Cáceres – Roldanillo hasta la descarga de la quebrada La Culebrera, esto equivale a un cubrimiento del 32.44% del área de la cuenca RUT y a 20 km + 760 m de longitud del canal interceptor.

Especial interés en materia de aporte de sedimentos, lo representa el primer tramo del canal interceptor en una longitud de 5 km, se trata de un tramo en donde se concentra la mayor cantidad de sedimentos, con aportaciones de las áreas de drenaje de las quebradas Cáceres – Roldanillo, quebrada El Rey, Quebrada Zanjón Hondo, y quebradas Santa Rita – Higuieroncito, y además del aporte de pequeñas corrientes de corta longitud que tributan al canal interceptor, por lo tanto, según ASORUT, corresponde a un sector crítico que demanda la mayor atención por concepto de producción de sedimentos.

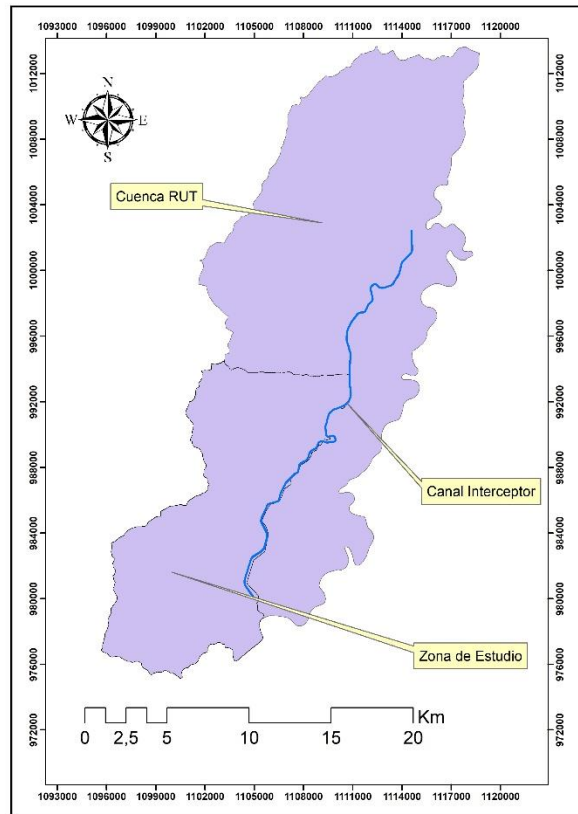


Figura 6. Cuenca RUT – zona de estudio y canal interceptor

4.4. COSTOS Y TASAS DE EXTRACCIÓN DE SEDIMENTOS EN CANAL INTERCEPTOR

En los últimos años, el volumen de sedimentos descargado sobre el canal interceptor viene aumentando progresivamente a valores muy elevados, $14 \text{ m}^3/\text{m}$ en un cauce de diez metros de ancho promedio, generando un intenso y permanente dragado para mantener la capacidad de conducción hidráulica del canal en un recorrido de 30 km + 400 metros. Este hecho, colmata la capacidad del canal interceptor del distrito de riego, afectando unas 1600 hectáreas de tierras cultivables, alrededor de 176 usuarios, por lo menos 10.500 empleos directos y unos 20.000 indirectos.

La operación de dragado genera altos costos al Distrito, 150 millones de pesos/Km/año, costo que se traslada vía tarifa a cada uno de los usuarios del distrito; como resultado del dragado, el depósito de sedimentos en cajuelas ubicadas en las márgenes del canal genera un problema de manejo de este material, además de la inestabilidad de la infraestructura hidráulica. Esta situación, produce serios perjuicios en la función operativa de ASORUT debido a los altos costos para enfrentar esta problemática, pero además se refleja en los más de 80.000 pobladores de estos municipios que deben enfrentar alzas de los precios de los alimentos, principalmente en épocas de invierno, estas situaciones de externalidad del

RUT afectan la calidad de vida de la comunidad y representa un problema económico, social y ambiental en todo el territorio. Las Figuras 7 y 8 ilustran la problemática asociada a la operación del dragado.



Figura 7. Dragado canal interceptor y depósito en cajuelas (fuente ASORUT)



Figura 8. Residuos flotantes en el canal y en estructuras hidráulicas (fuente ASORUT)

En la Tabla 8, se anotan las tasas de extracción en los primeros 5 kilómetros de canal, del km 30 al km 25, cabecera que se abastece de la estación de bombeo Tierra Blanca, en estos 5 km se encuentran la desembocadura de tres (3) quebradas (fuente: ASORUT, 2016).

Tabla 8. tasas de extracción de sedimentos – canal interceptor – 2010 a 2016 (fuente ASORUT).

AÑO	m ³ /m	Período de extracción	m ³ de sedimento en cajuela/ 5 km
2010	15	Anual	12,000
2011	16	Anual	12,000
2012	16	Anual	12,000
2013	9	Semestral	10,000
2014	8	Semestral	10,000
2015	6	Trimestral	5,000
2016	4	Trimestral	5,000

Por concepto de mantenimiento de 30 km de canal interceptor, construcción de cajuela (16,000 m³), movimiento de tierra (16,000 m³) y desazolve (14,000 m³), ASORUT en 2014 pagó la suma de \$4,277,000,000; en 2015, por construcción de cajuela (12,800 m³), movimiento de tierra (12,800 m³) y desazolve (9,000 m³), ASORUT pagó la suma de \$3,223,714,285 (Fuente ASORUT, 2016). Ver Figuras 9 y 10.

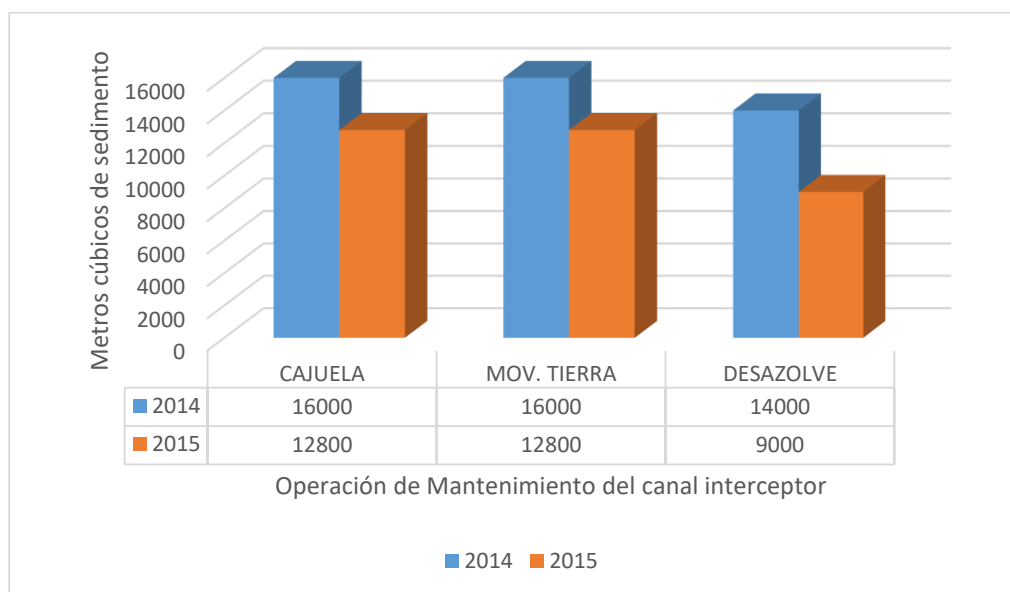


Figura 9. Mantenimiento canal interceptor del RUT – años 2014 y 2015 (fuente: ASORUT, 2016)

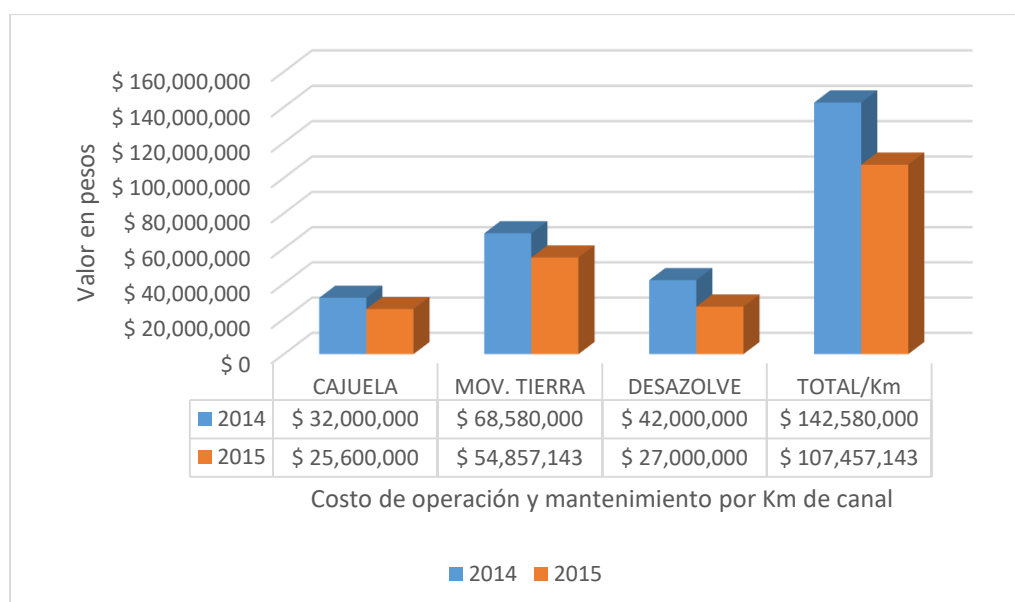


Figura 10. Costo de operación y mantenimiento por Km de canal interceptor (fuente: ASORUT, 2016)

El tramo de canal interceptor en donde se presentan las mayores tasas de extracción de sedimentos corresponde a los primeros 5 km de canal, según la dirección de la Unidad de operación y conservación de ASORUT, se trata de un tramo crítico en donde se concentran la mayor actividad de extracción de sedimentos en el canal interceptor (Figura 11).

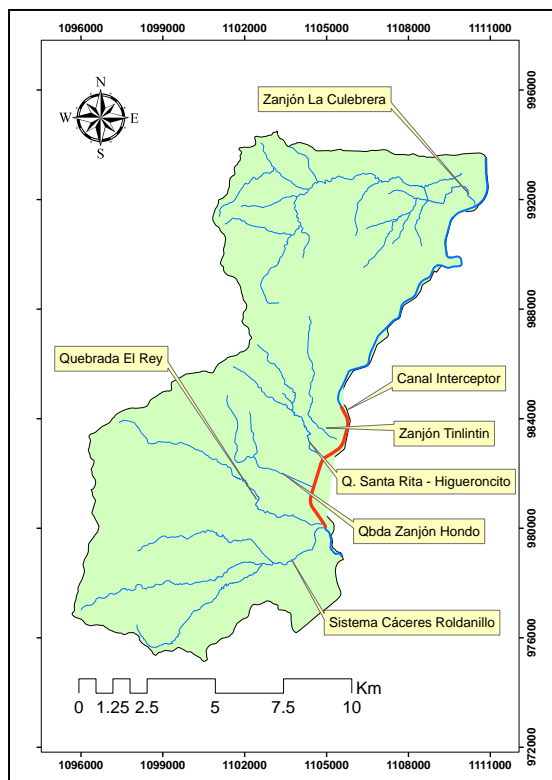


Figura 11. Tramo crítico canal interceptor

La red de drenaje de interés para el análisis se concentra entonces en dos redes de drenaje de aportación de caudales sólidos y líquidos; se trata del sistema hídrico de las quebradas Cáceres- Roldanillo y Rey, cuya área cubre 6,192.06 ha. y el sistema hídrico de las quebradas Santa Rita-Higueroncito y Tinlinton, con un área de aportación de 3,633.69 ha., lo anterior significa que el tramo crítico de canal interceptor de 5 km de longitud recibe las descargas de sedimentos de un área tributaria de 9,825.75 ha. (Figura 12).

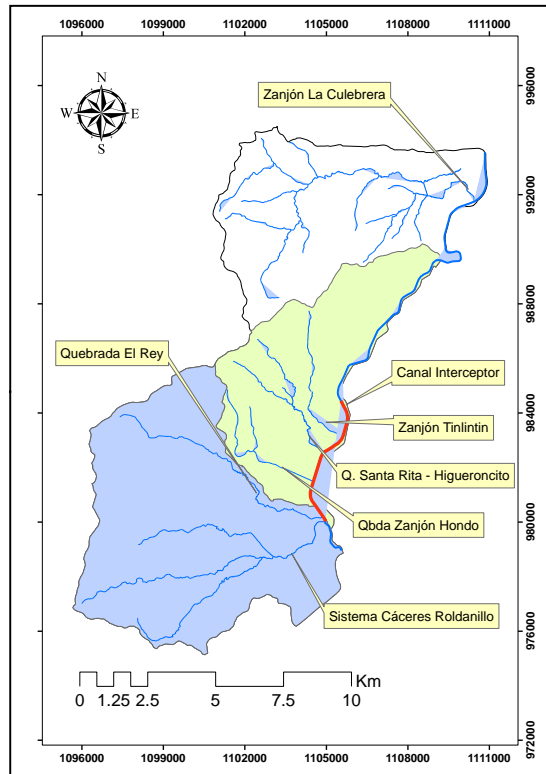


Figura 12. Áreas de drenaje asociadas a tramo crítico.

La extracción de sedimentos en el canal interceptor viene aumentando año tras año, y se agudiza cuando el mantenimiento es menor durante el año. Es importante resaltar la progresiva reducción anual del indicador m^3/m , este hecho responde al efecto de los mantenimientos periódicos porque han sido más eficaces y continuos, también responde a la régimen de lluvias imperante a lo largo del año, a menores lluvias menores volúmenes de sedimento depositados en el canal interceptor (L. Castillo, 2018).

En cuanto a la definición del volumen de excavación de cajuelas, es importante señalar que depende de la elevación del “Morro”, hecho que resulta de la práctica de operaciones de campo, y que determina hasta donde se debe excavar la cajuela y hasta donde depositar la extracción de azolves (L. Castillo, 2018).

Desafortunadamente, no se dispone de información detallada de los volúmenes de extracción de sedimentos, tampoco de los costos asociados a las prácticas de las operaciones de campo, a nivel mensual y de la periodicidad de los mantenimientos.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados que corresponden al procesamiento de la información asociada a cada uno de los factores que conforman la ecuación universal de pérdida de suelos, se presentan a continuación, en el mismo orden en que aparecen en la formulación USLE.

5.1. RESULTADOS FACTOR R – ZONA DE ESTUDIO

Parámetro relacionado con el poder de erosividad de la lluvia, la información se trata mediante los métodos directo e indirecto, luego se trata del ajuste de las series de datos a modelos linealizables y no linealizables, y finalmente se determina el factor R a nivel mensual.

5.1.1. Método directo

La Tabla 9, permite observar el resultado de lectura y procesamiento de un pluviograma, ejemplo de cálculo del índice de erosividad para un evento de precipitación, presentado en la estación ISUGU, el 21 de septiembre de 2012.

Tabla 9. Ejemplo de cálculo de Ei para un evento de lluvia

Cálculo de Ei para una precipitación					ESTACIÓN:	ISUGU
Fecha: 21-09-12						
Hora	Lamina (mm)	ΔT (minutos)	ΔP (mm)	intensidad (mm/h)	Ei (Mj/ha.mm)	Es (Mj/ha)
14:00	0					
14:30	7.3	30	7.3	14.60	0.221	1.611
15:00	20.2	30	12.9	25.80	0.242	3.125
15:30	20.6	30	0.4	0.80	0.111	0.044
16:10	20.9	40	0.3	0.45	0.089	0.027
16:40	21.3	30	0.4	0.80	0.111	0.044
Totales		160	21.3		E =	4.851
				I30 =	4.851	mm/h
				EI30 =	125.16	Mj.mm/ha.h

En la Tabla 10, se resume el cálculo de la energía cinética total de 123 eventos de lluvias, presentados en la estación pluviográfica ISUGU, durante el período 2012 a 2016; la última columna de la Tabla representa el factor R anual y, la fila de valores media representa los valores parciales del factor R asociados a cada uno de los meses del año.

Tabla 10. Cálculo de EI para lluvias

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2012	28.21	327.65	2.41	40.68	7.2	12.74	48.51	24.54	163.25	134.98	82.69	0	872.86
2013	5.19	49.66	447.11	390.97	527.74	2.17	269.28	0	338.88	9.38	252.73	22.09	1756.17
2014	7.05	62.1	66.57	40.66	9.47	32.38	0	119.5	27.54	246.94	250.94	45.71	657.92
2015	0	0	242.41	551.8	70.22	0	47.64	7.02	47.51	427.51	19.49	0	1100.97
2016	11.94	2.45	76.5	143.56	201.34	370.06	20.86	0	67.5	277.6	266.39	96.19	1171.78
SUMA:	52.39	441.86	835	1167.67	815.97	417.35	386.29	151.1	644.65	1096.41	872.24	163.99	5559.7
MAXIMO:	28.21	327.65	447.11	551.8	527.74	370.06	269.28	119.5	338.9	427.5	266.39	96.19	3770.32
MEDIA:	13.10	110.47	167.00	233.53	203.99	104.34	96.57	50.35	128.93	219.28	174.45	82.00	2779.85

Encontrados los valores del Factor R para la estación ISUGU, el siguiente paso consiste en preparar la información para determinar los valores del Factor R que corresponden a las estaciones pluviométricas influyentes.

5.1.2. Método Indirecto

La Tabla 11 contiene los valores totales mensuales de precipitación, en mm, periodo hidrológico 2012 a 2016, corresponden a la estación pluviométrica ISUGU, valores suministrados por el IDEAM, y estaciones pluviométricas Sabanazo, El Porvenir, Buenavista, El Lucero, La Despensa, El Aguacate, Montecristo y El Orégano, valores suministrados por parte de la CVC.

Tabla 11. Valores totales mensuales de precipitación (mm) – periodo: 2012 a 2016

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
ISUGU	21.86	50.72	86.96	124.26	105.52	45.62	44.48	42.84	66.30	105.22	97.52	45.16	836.46
SABANAZO	50.20	73.60	101.80	120.00	76.00	52.00	56.40	53.00	65.20	145.20	132.00	83.80	1009.20
EL PORVENIR	47.20	63.80	111.20	116.20	96.40	62.00	63.40	51.40	79.72	139.60	145.00	71.20	1047.12
BUENAVISTA	32.60	52.00	93.80	112.00	91.80	72.40	48.80	41.20	80.60	108.20	100.20	51.80	885.40
EL LUCERO	57.00	87.60	152.20	174.20	180.00	99.20	81.00	58.20	109.00	175.60	155.40	76.40	1405.80
LA DESPENSA	35.80	57.60	95.40	120.00	134.00	85.40	42.60	35.60	72.00	127.20	105.00	86.20	996.80
EL AGUACATE	90.80	129.80	187.20	191.60	187.60	102.00	93.00	73.40	135.80	261.00	294.60	196.20	1943.00
MONTECRISTO	56.40	92.80	104.40	131.80	123.80	63.00	55.40	35.60	84.80	156.80	190.20	100.40	1195.40
EL OREGANO	27.20	62.20	85.60	109.40	109.20	74.60	37.40	38.80	78.00	123.60	89.86	44.20	880.06

5.1.3. Aproximación a un ajuste de las series a un modelo lineal o linealizable

Se realizó una exploración o análisis del comportamiento de las series de precipitación respecto a un modelo de ajuste de regresión lineal o linealizable. Para la manipulación de datos, la realización de cálculos y gráficos, se utilizó el programa de análisis estadístico R; mediante la aplicación del Programa estadístico R a cada una de las series de precipitación, fue posible producir diagramas de dispersión entre la estación Isugú y cada estación en particular, el objetivo era ilustrar la posible asociación entre pares de variables; las Figuras 13 a 16 ilustran las características de dispersión de la nube de puntos. La Tabla 12 contiene los resultados del análisis a un ajuste de modelo lineal de las series de datos de precipitación.

Tabla 12. Resumen de ajuste de un modelo de regresión lineal (o linealizable)

Correlación entre ISUGU y estación	R ²	Ecuación	% de explicación	% explicado por otras variables no incluidas	Observación
La Despensa	0.7873	$Y=0.83x + 0.6909$	78.73	21.27	Aceptable
El Aguacate	0.5699	$Y= 0.35374x+12.4338$	56.99	43.01	Se descarta
Buenavista	0.8996	$Y=1.1201x-12.9404$	89.96	10.04	Aceptable
El lucero	0.9374	$Y=0.66988x-8.77174$	93.74	6.26	Aceptable
Montecristo	0.6518	$Y=0.5827x+11.6818$	65.18	34.82	Se descarta
Orégano	0.8597	$Y= 0.9538x-0.2415$	85.97	14.03	Aceptable
Porvenir	0.7805	$Y= 0.8571x-5.0823$	78.05	21.95	Aceptable

En síntesis, la mayor parte de las series se ajustan moderadamente a un modelo de regresión lineal, sin embargo por lo menos dos series no presentan un comportamiento aceptable, en consecuencia se decidió explorar otros modelos de ajuste.

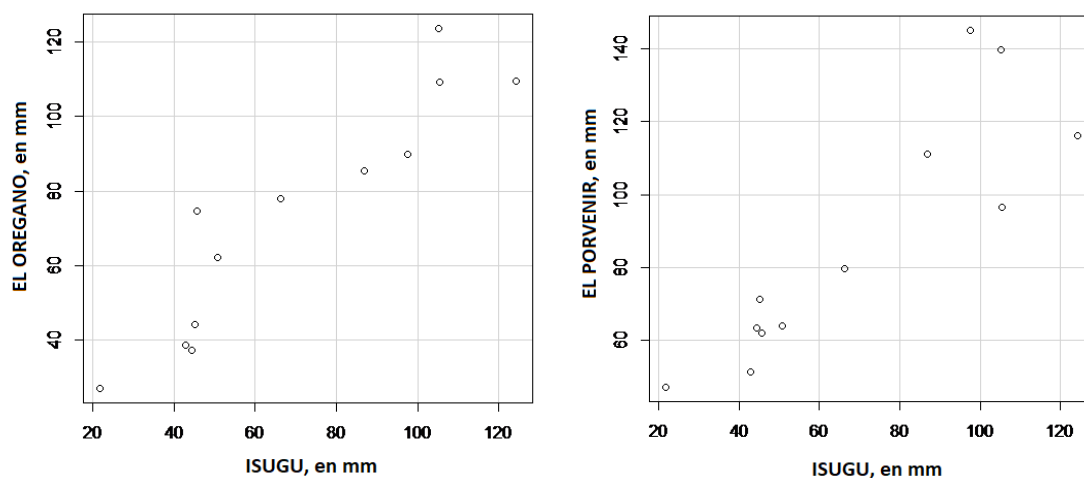


Figura 13. Diagrama de dispersión Est. Isugú vs Est. El Orégano y Est. El Porvenir

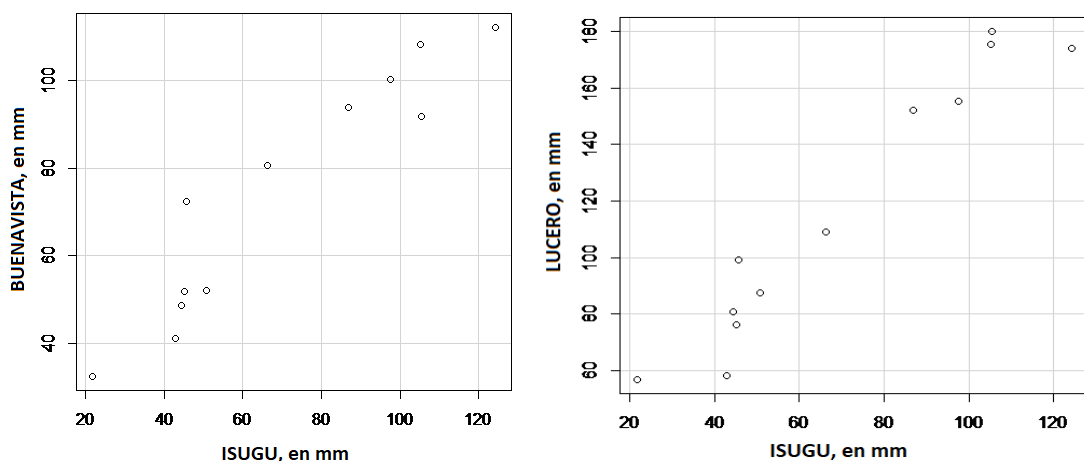


Figura 14. Diagrama de dispersión Est. Isugú vs Est. Buenavista y Est. El Lucero

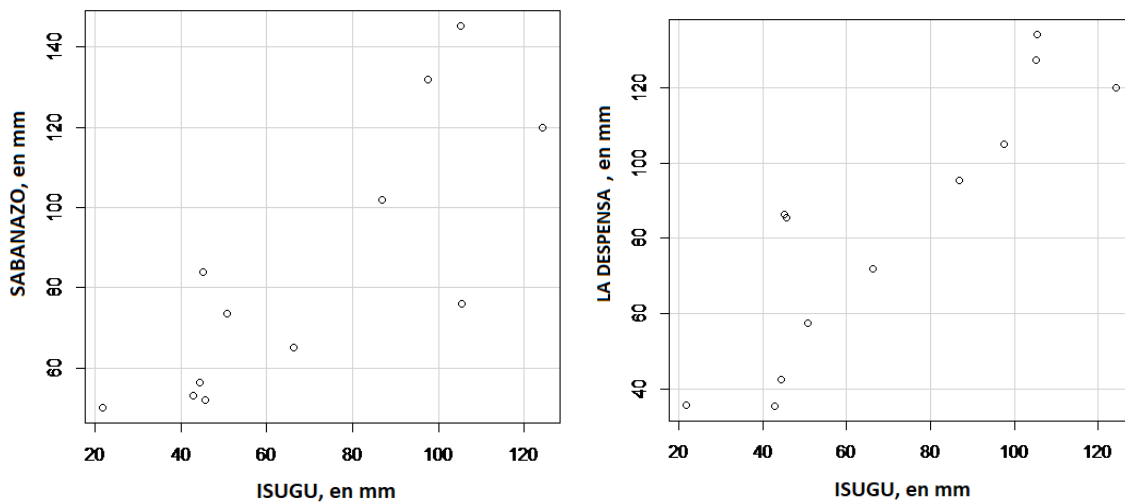


Figura 15. Diagrama de dispersión Est. Isugú vs Est. Sabanazo y Est. La Despensa

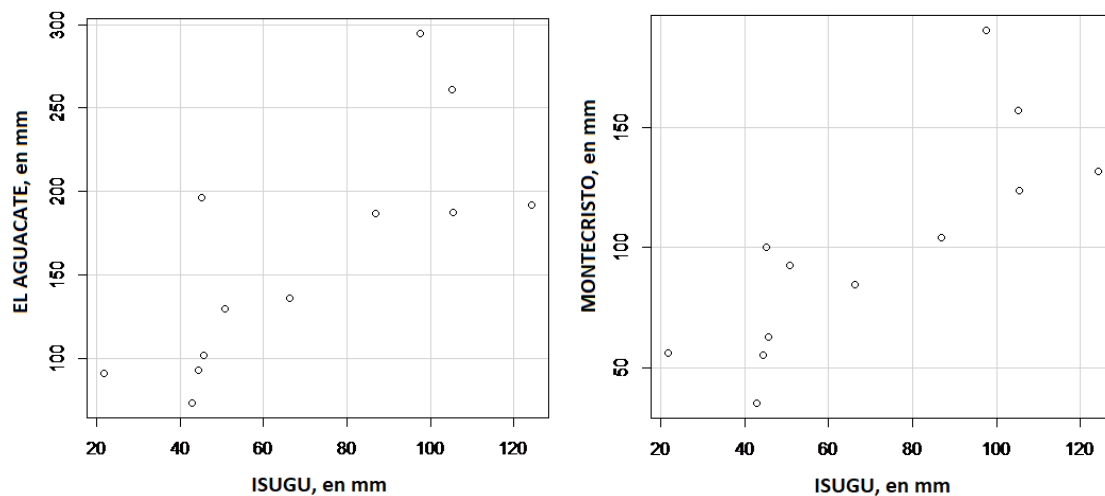


Figura 16. Diagrama de dispersión Est. Isugú vs Est. El Aguacate y Est. Montecristo

5.1.4. Ajuste de las series de precipitación a modelos no linealizables

Con la ayuda de la herramienta de cálculo Excel, se procedió a determinar cuál de los modelos se ajusta mejor a la nube de puntos; para cada relación de pareja de valores se determinó la ecuación y el modelo de mejor ajuste. En función del más alto valor del coeficiente de bondad de ajuste R^2 se determinaron los modelos con mejor comportamiento. En el caso de la estación Sabanazo, $R^2 = 0.6911$, indica que puede explicar el 69.11% de la variabilidad de la precipitación, el 31% lo pueden explicar otras variables no medidas, no incluidas en el modelo o simplemente variaciones debidas al azar. Para el resto de las estaciones, el 83.77%, 91.27% y 94.04% permiten explicar de mejor manera la variabilidad de la precipitación entre estaciones.

La Tabla 13 ilustra los modelos de correlación, las ecuaciones de mejor ajuste de la nube de puntos y el coeficiente de bondad de ajuste R^2 .

Tabla 13. Comparación de Modelos de ajuste para el comportamiento de lluvias mensuales entre estaciones influyentes (Periodo: 2012 – 2016).

ESTACIÓN	MODELO	ECUACIÓN	R^2
Sabanazo	Exponencial	$Y = 40.265 e^{0.0096x}$	0.6911
El Porvenir	Potencial	$Y = 5.0144X^{0.6753}$	0.8377
Buenavista	Polinómica	$Y = -0.0039X^2 + 1.3758X + 0.5142$	0.9127
El Lucero	Polinómica	$Y = -0.0032X^2 + 1.8724X + 5.3298$	0.9404
La Despensa	Polinómica	$Y = -0.0023X^2 + 1.2826X + 6.9036$	0.7901
El Aguacate	Exponencial	$Y = 70.967 e^{0.01061x}$	0.6096
Montecristo	Polinómica	$Y = -0.001x^2 + 0.2113x + 20.66$	0.9654
El Oregano	Polinómima	$Y = -0.0041x^2 + 1.5128x - 7.9487$	0.871

Con la determinación de la curva de mejor ajuste a las nubes de puntos, se establece que las relaciones entre variables lineal no representa la mejor opción, que el modelo predominante es el polinómico, y en menor proporción el modelo exponencial.

Los parámetros estadísticos indican que el coeficiente de correlación (r) oscila entre 0.7807 a 0.9825; valores cercanos a 1 implican que la mayor parte de la variabilidad de una variable está explicada por el modelo de regresión, por lo tanto, los modelos parecen estar bien ajustados (ver Figuras 17 a 20).

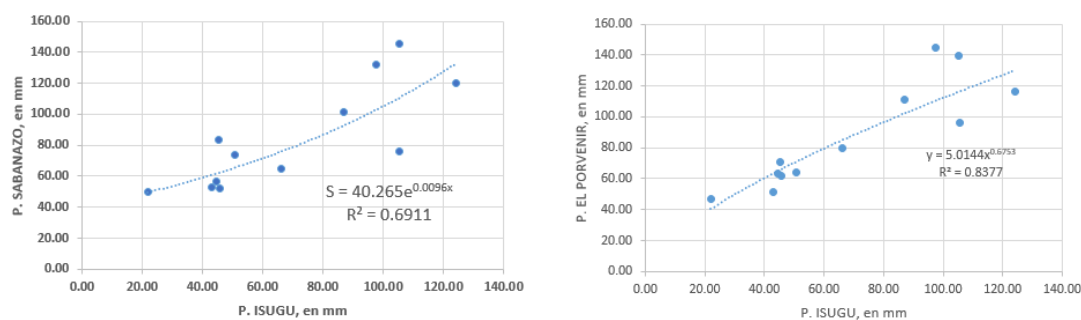


Figura 17. Ajuste Est. Isugú vs Est. Sabanazo y Est. El Porvenir

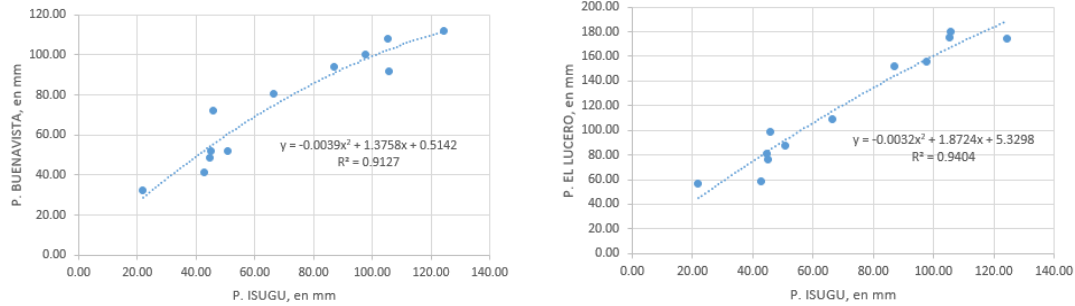


Figura 18. Ajuste Est. Isugú vs Est. Buenavista y Est. El Aguacate

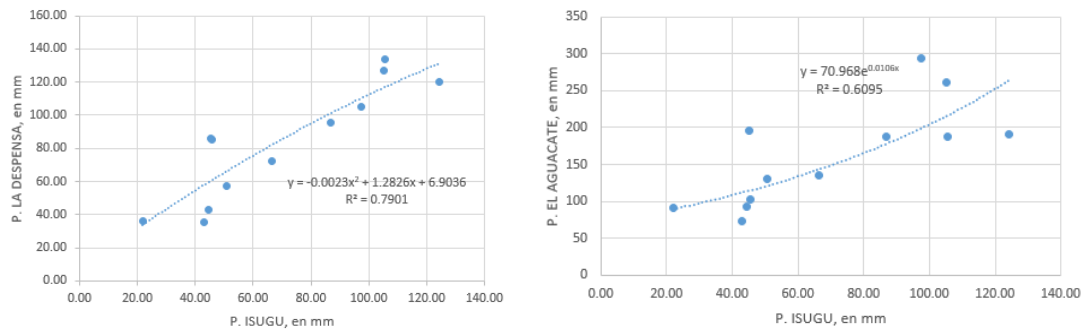


Figura 19. Ajuste Est. Isugú vs Est. La Despensa y Est. El Aguacate

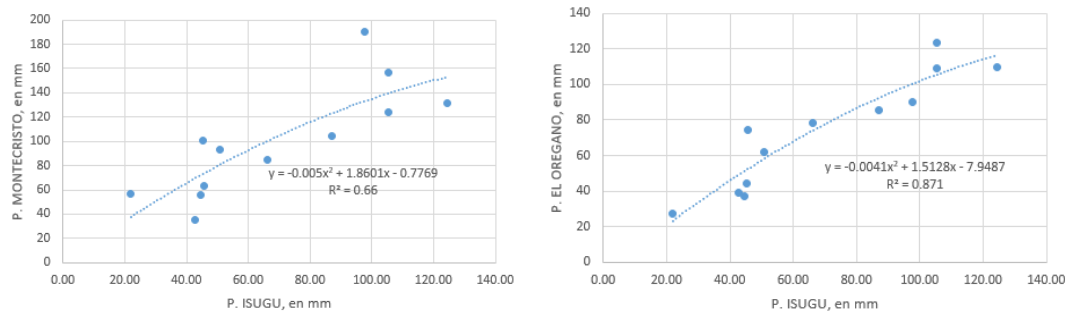


Figura 20. Ajuste Est. Isugú vs Est. Montecristo Est. El Oregano

A partir de los valores del factor R y de los valores de precipitación de la estación ISUGU, se evalúan diferentes tipos de función, a saber: lineal, exponencial, logarítmica, polinómica, encontrando que comparativamente el mejor indicador se obtiene con una relación de tipo polinómica.

$$\text{Factor } R = -0.0085 P^2 + 3.295 P - 48.193 \quad R^2 = 0.9577 \quad (21)$$

La Figura 21 permite observar el comportamiento de la nube de puntos entre el Factor R y la precipitación media mensual, con un indicador de ajuste $R^2 = 0.9577$, o sea que los datos de precipitación permiten explicar el 95.77% de los datos del Factor R.

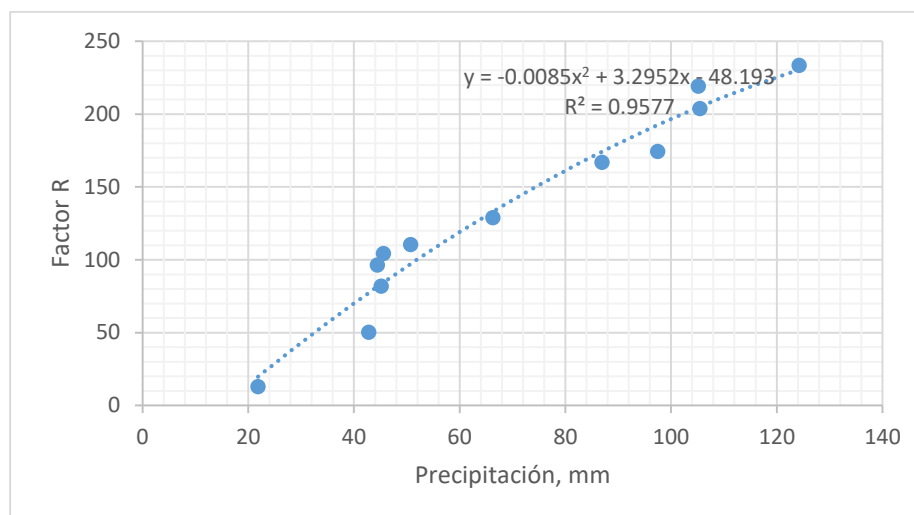


Figura 21. Modelo de ajuste entre precipitación y factor R

5.1.5. Valores totales mensuales del factor R

La relación encontrada entre el Factor R y los valores de precipitación, permite generar los valores totales mensuales del factor R para cada una de las estaciones de la zona de estudio. El análisis corresponde al período hidrológico 2012 a 2016, los resultados se ilustran en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores totales mensuales del factor R – Período hidrológico: 2012 a 2016

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
ISUGU	13.1	110.47	167	233.53	203.99	104.34	96.57	50.35	128.93	219.28	174.45	82	1584.01
SABANAZO	95.8	148.27	199.15	224.81	153.13	100.16	110.61	102.57	130.51	251.04	238.64	168.24	1922.93
EL PORVENIR	88.39	127.43	213.1	219.92	190.45	123.42	126.54	98.71	160.46	246.14	250.87	143.32	1988.75
BUENAVISTA	50.19	100.16	186.09	214.22	182.66	145.81	92.36	73.13	162.16	208.81	196.63	99.68	1711.9
EL LUCERO	112.01	175.22	256.4	267.86	269.51	195.03	162.93	114.78	209.97	268.31	258.58	153.93	2444.53
LA DESPENSA	58.87	113.4	188.79	224.81	240.71	171.21	76.75	58.34	144.98	233.4	204.07	172.68	1888.01
EL AGUACATE	180.91	236.29	270.74	271.09	270.8	199.46	184.73	147.87	242.51	232.77	184.81	271.08	2693.06
MONTECRISTO	110.61	184.38	202.55	238.43	229.45	125.66	108.26	58.34	170.1	259.48	271.02	196.94	2155.22
EL OREGANO	35.14	123.87	171.58	210.55	210.26	150.31	63.15	66.86	157.1	229.21	179.26	80.84	1678.13

Respecto a una clasificación de rangos típicos de R de la zona de estudio, según referencia Tabla15, se puede establecer que corresponde a una Clase Mediana, como quiera que se encuentra comprendida en un rango de valores de R entre 1000 a 3000 MJ/ha*mm/hr, situación de esperar, como quiera que la zona de estudio se encuentra bajo un régimen de sotavento, precipitación orográfica proveniente del pacífico colombiano.

Tabla 15. Clasificación de rangos típicos de R anual

Clase	R (MJ/ha*mm/hr)
Muy baja	< 500
Baja	500 - 1000
Mediana	1000 - 3000
Alta	3000 - 6000
Muy Alta	>6000

A partir de los valores totales mensuales del factor R, resumidos en la Tabla 14, para cada estación de medición de la zona de estudio, se construyó una gráfica de distribución de la erosividad de la lluvia a través del año; se observa un comportamiento típico bimodal, el cual coincide en sus valores máximos con los periodos húmedos y valores mínimos en los periodos secos (Figura 22).

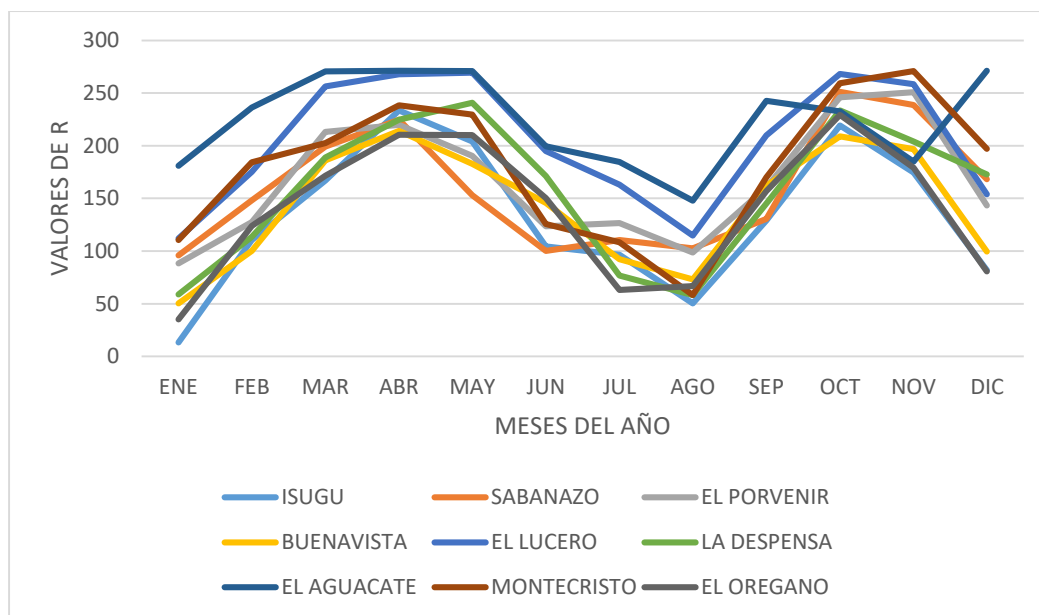


Figura 22. Distribución de la erosividad de la lluvia a través del año, áreas de drenaje Quebradas Cáceres - Roldanillo hasta Quebrada La Culebrera – Periodo: 2012 a 2016.

5.1.6. Mapa de curvas isoerodental – Factor R

Se realizó una primera exploración de resultados a través de la aplicación de los denominados polígonos de Thiessen, por lo tanto, se recurrió a la herramienta de geoproceto del SIG para obtener las áreas de influencia de cada estación de la zona de estudio; mediante el uso de esta aplicación se determinaron los mencionados polígonos (Figura 23). El tratamiento posterior de estas áreas para la obtención del plano de Isoerodental conllevó a descartar esta opción por considerarse inapropiada, dado que no reflejaba la situación real en materia de distribución geográfica del factor de erosividad R.

Como quiera que la elaboración del plano R, en términos de calidad no acepta el modelo de Thiessen, se procedió a realizar una interpolación determinística (modelo IDW) con

pixeles de 10 x 10 metros; técnica que permitió encontrar una distribución de valores de erosividad acorde con las características de las áreas de drenaje, tanto en formato raster como en formato vectorial, curvas de isoerodental (Figuras 24 y 25).

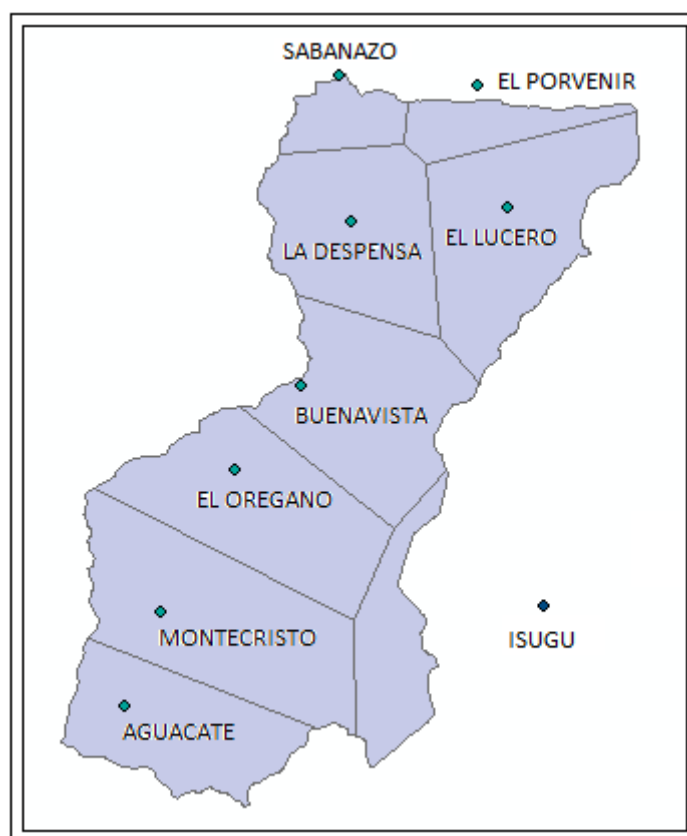


Figura 23. Polígonos de Thiessen – Zona de estudio

El procedimiento continúa con la definición de los rangos de trabajo de valores del factor R, los cuales aparecen en la Tabla 16.

Tabla 16. Definición de rangos de R anual

Clase	Rango de R Mj/ha*mm/h
1	$1600 \leq R < 1800$
2	$1800 \geq R < 1900$
3	$1900 \leq R < 2000$
4	$2000 \leq R < 2100$
5	$2100 \leq R < 2200$
6	$2200 \leq R < 2300$
7	$2300 \leq R < 2400$
8	$2400 \leq R < 2500$
9	$R > 2500$

Con base en los valores obtenidos del factor de erosividad R, se procede con la ayuda de la herramienta de trabajo del SIG, a preparar y generar los planos con imágenes raster y las curvas de iso - R o Isoerodental a nivel anual, éstas se ilustran en la Figuras 24 y 25.

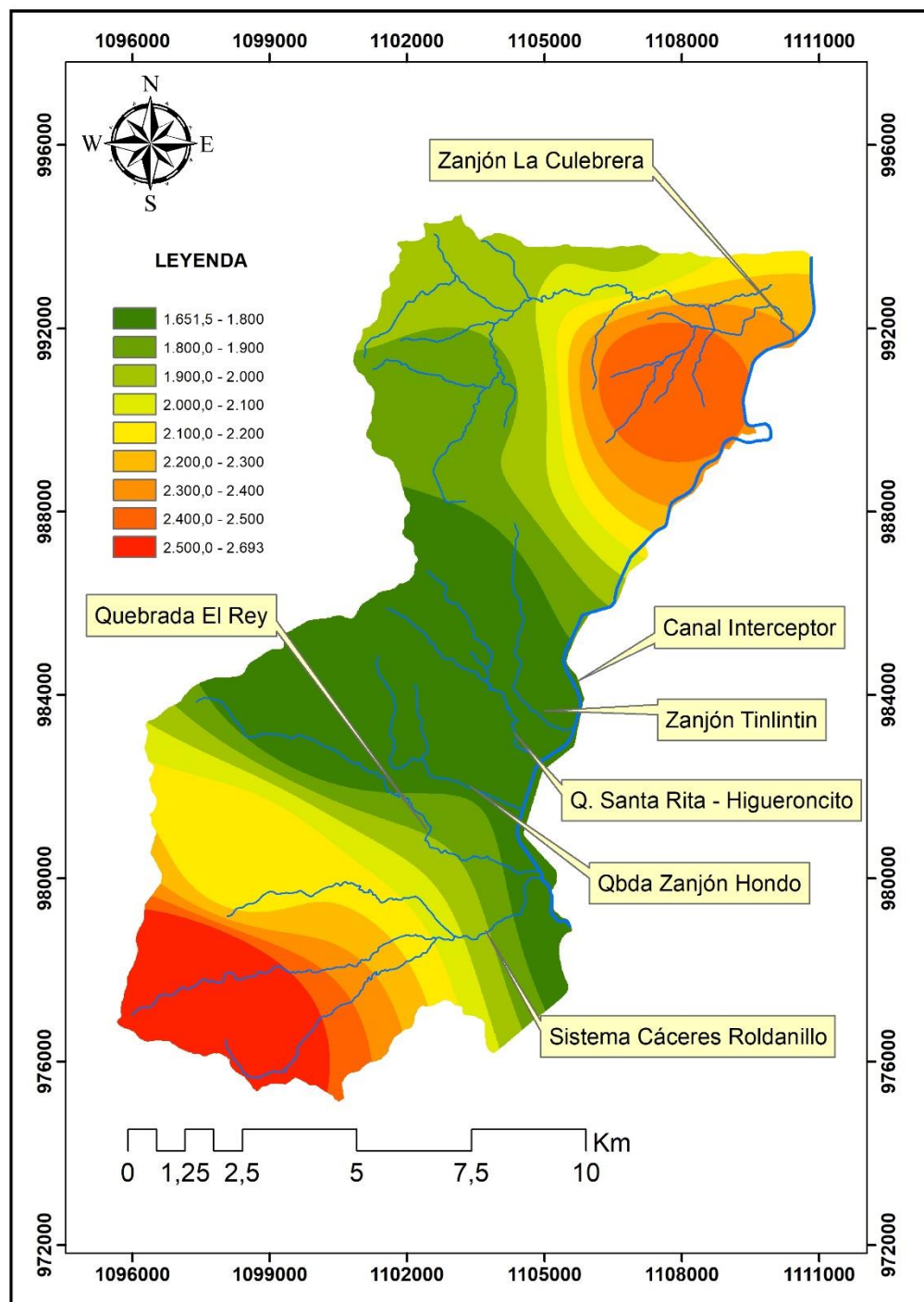


Figura 24. Mapa isoerodental – Factor R (Imagen raster).

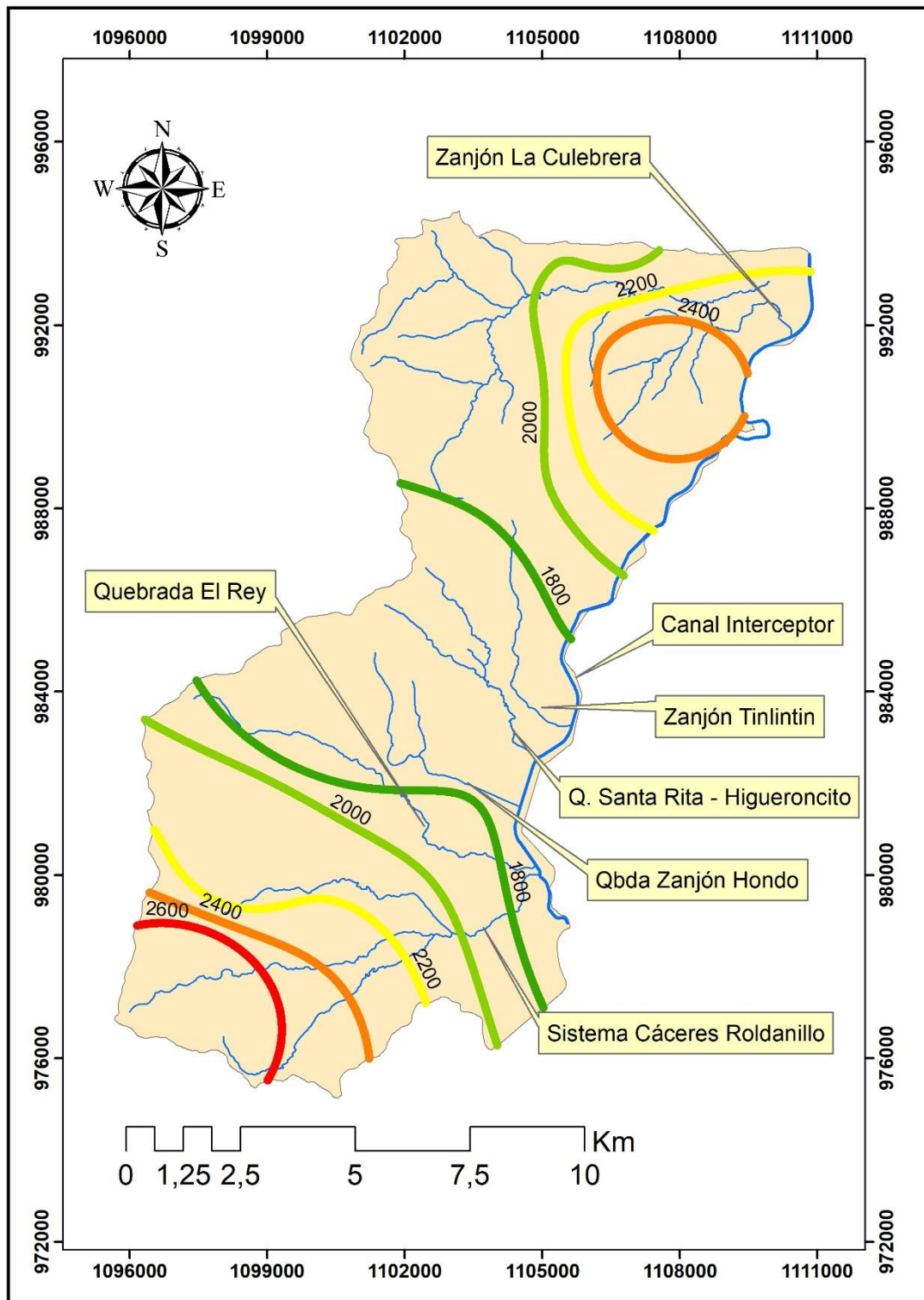


Figura 25. Curvas isoerodental – Factor R – zona de estudio.

De acuerdo con los resultados encontrados en el comportamiento de la distribución espacial del factor R en la zona de estudio, figuras 24 y 25, se puede establecer que existen dos zonas bien definidas, en donde se concentra el mayor poder de erosividad de las lluvias; se trata de las áreas de drenaje ubicadas en el extremo sur y norte respectivamente. La zona sur se caracteriza por tener la más alta escala de erosividad de la acción de las lluvias y está representada por las áreas de drenaje de las quebradas Cáceres – Roldanillo y la quebrada El Rey, y en el norte de la zona de estudio, la representación corresponde a la quebrada La Culebrera.

La parte central de la zona de estudio está representada por un conjunto de corrientes comprendidas entre las quebradas Zanjón Hondo hasta el Zanjón Tinlín, y con base en la distribución espacial del factor R, éstas se encuentran sometidas a una menor intensidad de ocurrencia del poder de erosividad de las lluvias.

Los mayores esfuerzos operativos del distrito RUT, se encuentran justamente concentrados en las descargas de sedimentos que transportan las corrientes tributarias en 5 km del canal interceptor; de acuerdo al abscisado del canal de drenaje interceptor corresponde al tramo comprendido entre el Km 25 a km 30. La experiencia local señala las corrientes Cáceres – Roldanillo y la quebrada El Rey como las mayores aportadoras de sedimentos, por lo tanto, la ubican como una zona crítica en materia de aportación de caudales sólidos; el anterior comportamiento coincide con los resultados que arrojan las curvas isoerodental, por lo tanto, se puede concluir que existe armonía entre lo observado, la realidad, y lo estimado en materia de producción y dragado de sedimentos en el canal interceptor.

5.2. RESULTADOS FACTOR K EN ZONA DE ESTUDIO

Se parte de la información de perfiles de unidades de suelos en zona de ladera, y de zona plana en área de estudio. Información generada y suministrada por la CVC y por el IGAC, datos consignados en las Tablas 17 y 18 respectivamente. Sobre la base de los datos de atributos de los perfiles, textura y materia orgánica, se determinaron los valores asociados del factor de suelo K. Imágenes de calicatas y perfiles de suelos asociados, se pueden apreciar en el anexo A del presente trabajo.

Tabla 17. Identificación de unidades de suelos en zona de Ladera en área de estudio.

Perfil	Profundidad (cm) Horizonte	Latitud	Longitud	Textura	C.O. %	M.O. %	K
CVC 132	00 - 38 Ap	4°26'18,701"N	76°10'15,499"W	Franco Arcillo Arenosa	1.10	1.89	0.032
CVC 133	00 - 55 Ap	4°24'12,200"N	76°9'49,288"W	Franco Arcillo Limosa	1.75	3.01	0.042
CVC 150	00 - 14 Ap	4°23'51,389"N	76°10'1,960"W	Franca	3.00	5.17	0.038
CVC 186	00 - 18 Ap	4°29'51,029"N	76°9'13,500"W	Franca	1.88	3.24	0.038

Fuente: Informe (2016). Estudio semidetallado de suelos de las cuencas priorizadas por la CVC sobre la cordillera occidental – Convenio Interadministrativo 4488 IGAC – 087 CVC 2014.

Tabla 18. Identificación de unidades de suelos zona plana en área de estudio (año 2004) – Fuente CVC.

Unidad	Perfil	Identificación	Textura	Mat. Orgánica	K
SJ	V91	San José	Fina	Alto en C org.	0.025
SJPM	V56	San José Palmeras	Moderadamente fina	Alto	0.016
GL	V26	Galpón	Fina	Mediano	0.030
NM-SN	V18	Nima San Francisco	Moderadamente fina	Mediano	0.017
RTar	V106	Ricaurte	Fina	Alto	0.016
SN	V115	San Francisco	Media	Mediano	0.045
AM	ES4	Amaime	Gruesa	Bajo	0.007
CK	V3	Coke	Media	Bajo	0.050
MN	V32	Manuelita	Moderadamente fina	Mediano	0.017
RJ-PO	VA12	Río de Janeiro Palma Sola	Muy fina	Bajo	0.017
PL	V65	Palmira	Media	Alto	0.038
SOa	V55	Sonso	Moderadamente fina	Mediano	0.017
BAakr	VS49	Buenos aires	Fina	Bajo	0.017

Con la información de suelos disponible, parte de ladera con 4 perfiles y parte plana con 13 perfiles, se procedió a complementar la Tabla de atributos para cada unidad y perfil de suelos, cumplida esta actividad se dio curso a la superposición de planos y atributos de la misma, dando como resultado el plano temático que se ilustra en la Figura 26.

Tabla 19. Rangos Factor K zona de estudio

Clase	Rango factor K	Clasificación
1	0.0 a 0.0038823	Muy Bajo
2	0.0038823 a 0.030	Bajo
3	0.030 a 0.0381176	Moderado
4	0.0381176 a 0.045	Alto

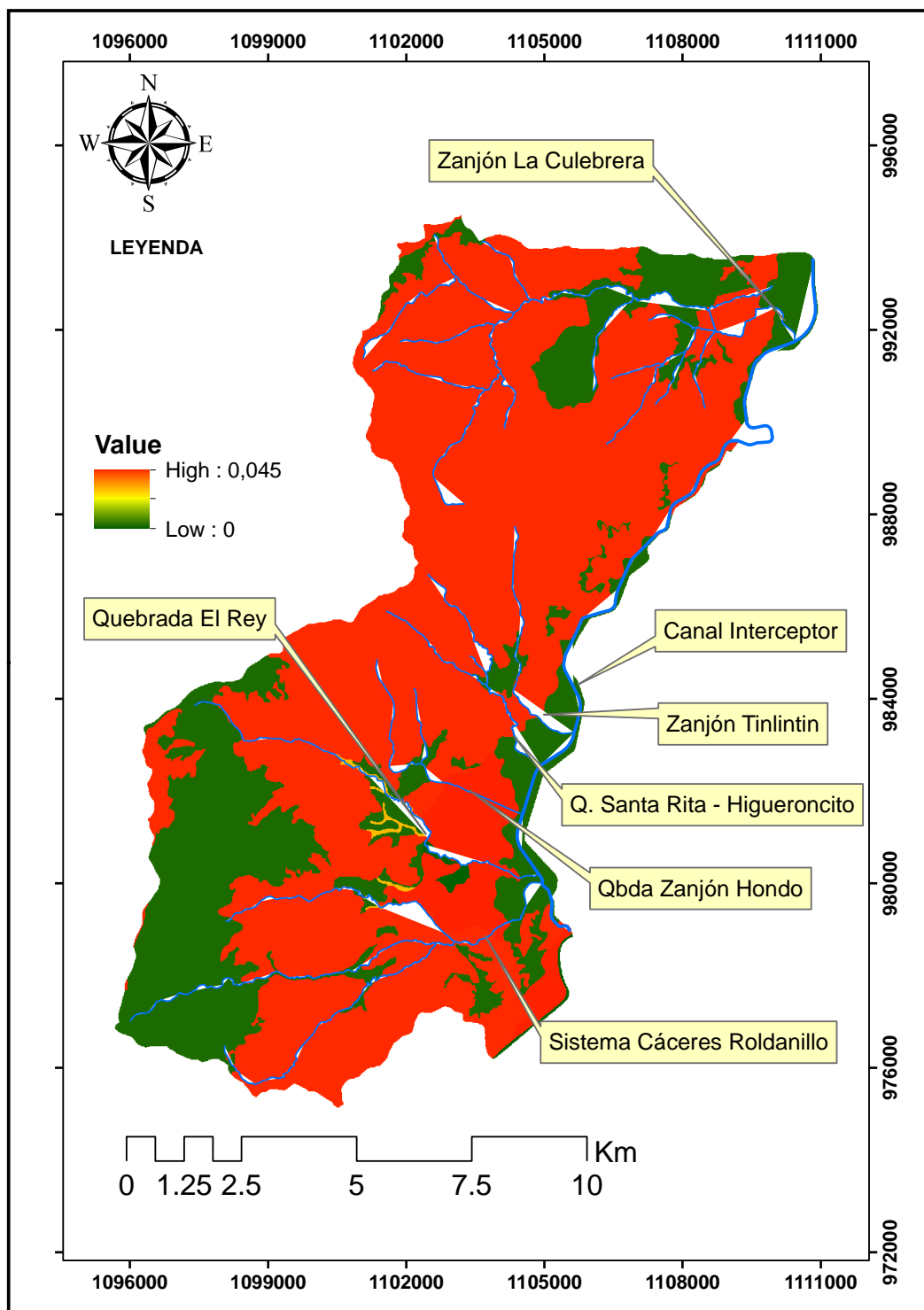


Figura 26. Factor K – imagen Raster, zona de estudio

5.3. RESULTADOS FACTOR TOPOGRÁFICO L.S. EN ZONA DE ESTUDIO

Para determinar el factor topográfico se establecieron en primera instancia rangos de pendiente, en términos de porcentaje y la inclinación de la longitud del área en grados; mediante el aprovechamiento de imágenes digitales de elevación de terreno de la cuenca RUT, se procedió a seleccionar o cortar mediante la herramienta geoproceto (Clip), la porción de área correspondiente a la zona de estudio; sobre la base mencionada se determinaron las áreas, en ha., y los correspondientes porcentajes de área para cada rango de pendiente de la zona de estudio (Tabla 20).

Tabla 20. Rangos de pendientes y áreas – Zona de estudio cuenca RUT

Rango (%)	θ grados	Clasificación	Área (ha.)	% área
0 3	0.8594	Muy plano	1784	12.604
3 7	2.8624	Plano	866	6.118
7 12	5.4268	Casi plano	647	4.571
12 25	10.4812	Ondulado	2297	16.229
25 50	20.5560	Muy ondulado	6884	48.636
50 75	32.0054	Escarpado	1667	11.778
>75	41.1859	Muy escarpado	9	0.064

Sobre la base de la definición de imágenes Raster con píxeles 10 x 10, y teniendo en cuenta los rangos teóricos asociados al exponente m, se determinaron los parámetros unitarios de parcela L, y de pendiente S; el factor topográfico se genera mediante la superposición de planos temáticos, lo que equivale a multiplicar los respectivos parámetros para encontrar el factor L.S (Tabla 21). En la Tabla 22 se presentan los rangos de valores obtenidos en el procesamiento.

Tabla 21. Valores del factor L.S para cada rango de pendiente.

Rango (%)	θ grados	m	L	S	L.S
0 3	0.8594	0.3	0.788	0.1383	0.10902
3 7	2.8624	0.4	0.7281	0.4156	0.30263
7 12	5.4268	0.5	0.6726	0.8829	0.59385
12 25	10.4812	0.5	0.6726	2.9014	1.9515
25 50	20.5560	0.5	0.6726	8.9354	6.01
50 75	32.0054	0.5	0.6726	22.3015	15
>75	41.1859	0.5	0.6726	26.7618	18

Tabla 22. Rangos de Factor L.S

Clase	Rango factor L.S
1	0.1090 a 0.5299
2	0.5299 a 1.9331
3	1.9331 a 6.0025
4	6.0025 a 18

La Figura 27 representa el resultado obtenido asociado al factor topográfico L.S.

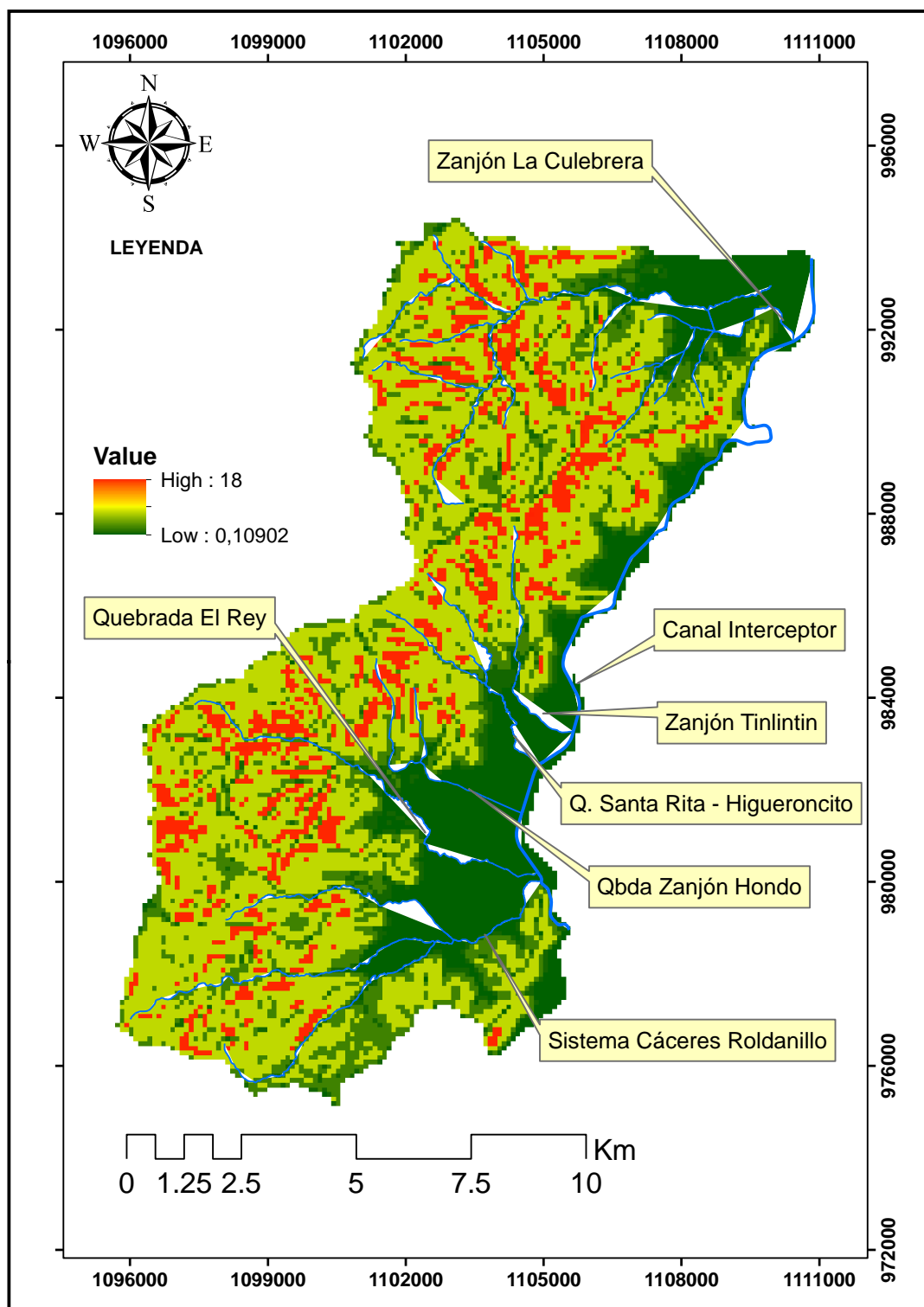


Figura 27. Factor L.S – imagen Raster, zona de estudio.

5.4. RESULTADOS FACTOR C – COBERTURA VEGETAL EN ZONA DE ESTUDIO

Para determinar qué tipo de coberturas vegetales están presentes en la zona de estudio, se procedió a consultar los planos temáticos suministrados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, se trata de información digitalizada y actualizada, referentes al área de su jurisdicción. Mediante la herramienta de corte del SIG se procedió a separar la información de cobertura vegetal ajena a la cuenca RUT; posteriormente, se separó la información de cobertura vegetal no correspondiente a la zona de estudio. Sobre la base anterior se determinó las coberturas existentes en el área de estudio.

Tabla 23. Rangos de factor C de cobertura vegetal

Clase	Rango factor C
1	0 – 0.098
2	0.098 – 0.1568
3	0.1568 – 0.2627
4	0.2627 – 0.4588
5	0.4588 – 1.0

Las zonas bajas próximas al canal interceptor presentan los indicadores más críticos en cuanto a cobertura vegetal, estas áreas coinciden con zonas de cultivos comerciales, y espacios ocupados por infraestructura rural y urbana. La cuenca de la quebrada el Rey, en su parte media a baja presenta baja cobertura vegetal, por lo tanto, mayor exposición a la fuerza erosiva de las lluvias. Igual situación se repite en el área de drenaje del Zanjón La Culebrera, situación que se agudiza por la intensa actividad agrícola en su entorno.

A partir del mapa de cobertura vegetal, Figura 28, se puede observar algunos focos dispersos en toda la cuenca RUT, en los cuales la cobertura vegetal es escasa, estos lugares se encuentran definidos en los alrededores de las partes altas de la cuenca RUT.

La mayor concentración de áreas con la máxima desprotección en materia de cobertura vegetal se presenta en la cuenca baja de Zanjón Hondo, suelos con bajo contenido de materia orgánica y expuestos a la acción erosiva de las lluvias; tanto el sistema de drenaje de las quebradas Cáceres – Roldanillo y el sistema hídrico Zanjón Hondo, quebrada Santa Rita - Higueroncito, vierten caudales sólidos al canal interceptor del Distrito de riego RUT, situación que armoniza con el tipo de suelos predominante en sus áreas de drenaje.

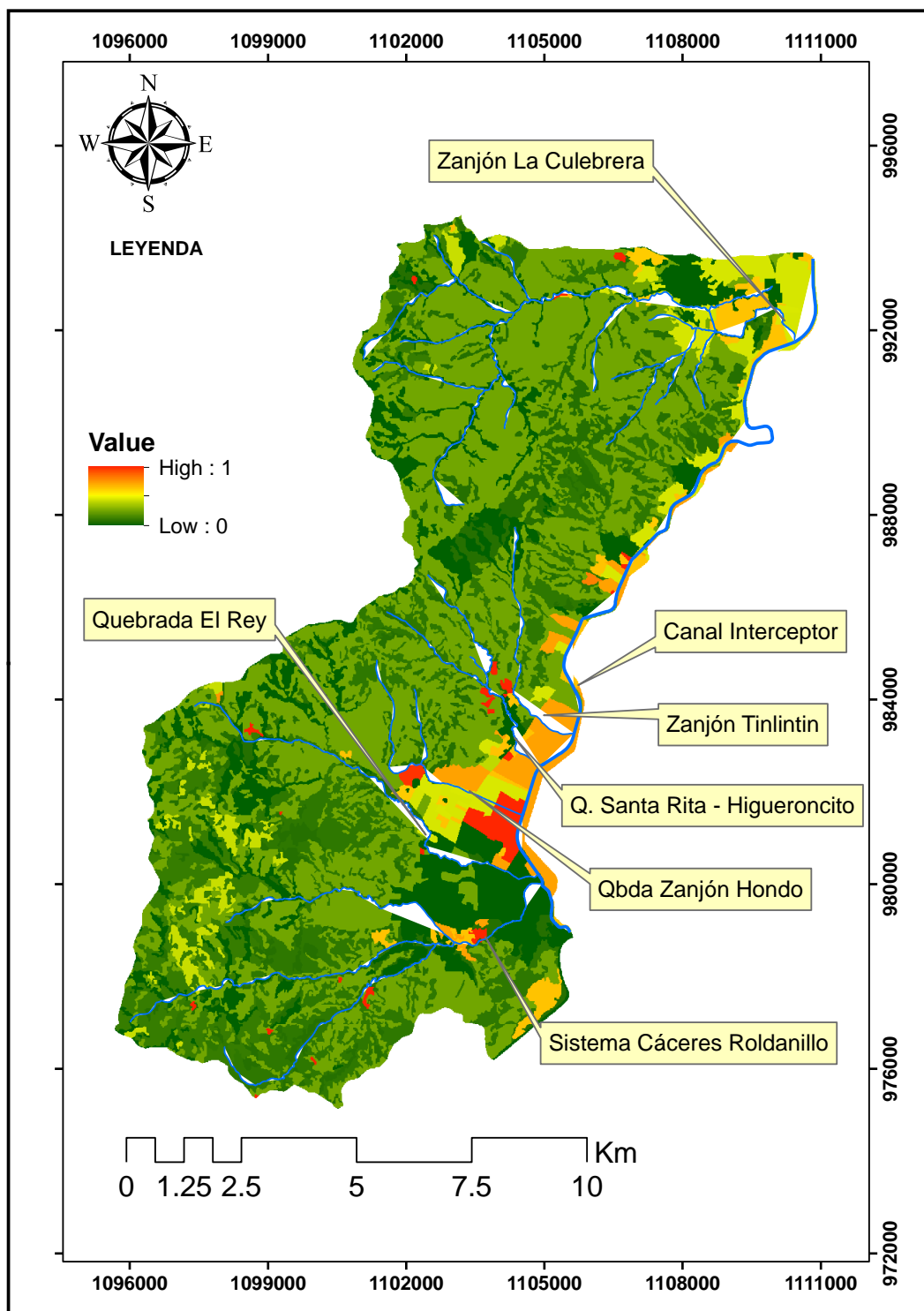


Figura 28. Factor C de cobertura vegetal en zona de estudio

5.5. FACTOR P DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS EN ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio no cuenta con la disponibilidad de datos de campo ni información georreferenciada relacionada con el desarrollo de programas de prácticas de conservación de suelos en curvas de nivel, de trabajos en fajas y/o en terrazas, en consecuencia, la aplicación del factor P no resulta realista; el establecimiento de prácticas de conservación de suelos, tanto en actividades agrícolas como pecuarias, se reconoce que son determinantes en la mitigación del riesgo de degradación del suelo, sin embargo es conveniente indicar que la aplicación del factor P sólo se hará posteriormente, de manera hipotética, en el marco de escenarios de referencia, a lo que más adelante se denominará zona crítica, o sea, áreas de drenaje asociadas a vertimientos entre los kilómetros 25 a 30 en el trayecto del canal interceptor.

5.6. EROSIÓN POTENCIAL EN ZONA DE ESTUDIO

Cuando se plantea el tema de erosión potencial, no es otra cosa que suponer que la cuenca se encuentra completamente desnuda, sin cobertura vegetal, por lo tanto, se asume que existe siempre suelos a disposición, y sometidos a la acción directa de las lluvias, así como a las fuerzas gravitacionales representadas por el factor pendiente; la acción combinada de los factores mencionados sin el factor de cobertura vegetal significa, en términos sencillos, lo que se conoce como erosión potencial.

En la determinación de la erosión potencial del suelo intervienen tres factores, a saber: el factor lluvia (R), el factor suelo (K) y el factor topográfico (L.S); por lo tanto, la erosión potencial se calcula mediante la multiplicación de los factores mencionados ($A \text{ potencial} = R * K * L.S$). Los resultados del geoproceto de superposición de los factores anteriores, permite determinar áreas de acuerdo con rangos de erosión, Tabla 24, y a su vez, generar el mapa de erosión potencial de la zona de estudio, ver Figura 29.

Tabla 24. Clasificación de la erosión potencial, rangos y áreas en zona de estudio

Clasificación de la erosión potencial en zona de estudio	Rango de erosión (Ton/ha/año)	Área (ha)	% Área
Ligera	< 100	1763.24	12.53
Moderada	100 – 500	859.85	6.11
Fuerte	500 – 1500	638.16	4.53
Severa	>1500	10811.05	76.82
TOTAL:		14072.36	100.0 %

La Tabla 24 permite establecer que la mayor parte de la cuenca RUT presentaría erosión severa, con un 76.82% del área, seguido de un 12.53% de erosión ligera. La Figura 29 permite observar que las zonas más bajas y próximas al canal interceptor, podrían verter entre 19.6 a 100 ton/ha/año, mientras que las áreas medias y altas de la cuenca RUT, tiene un potencial de entrega superior a 1500 ton/ha/año.

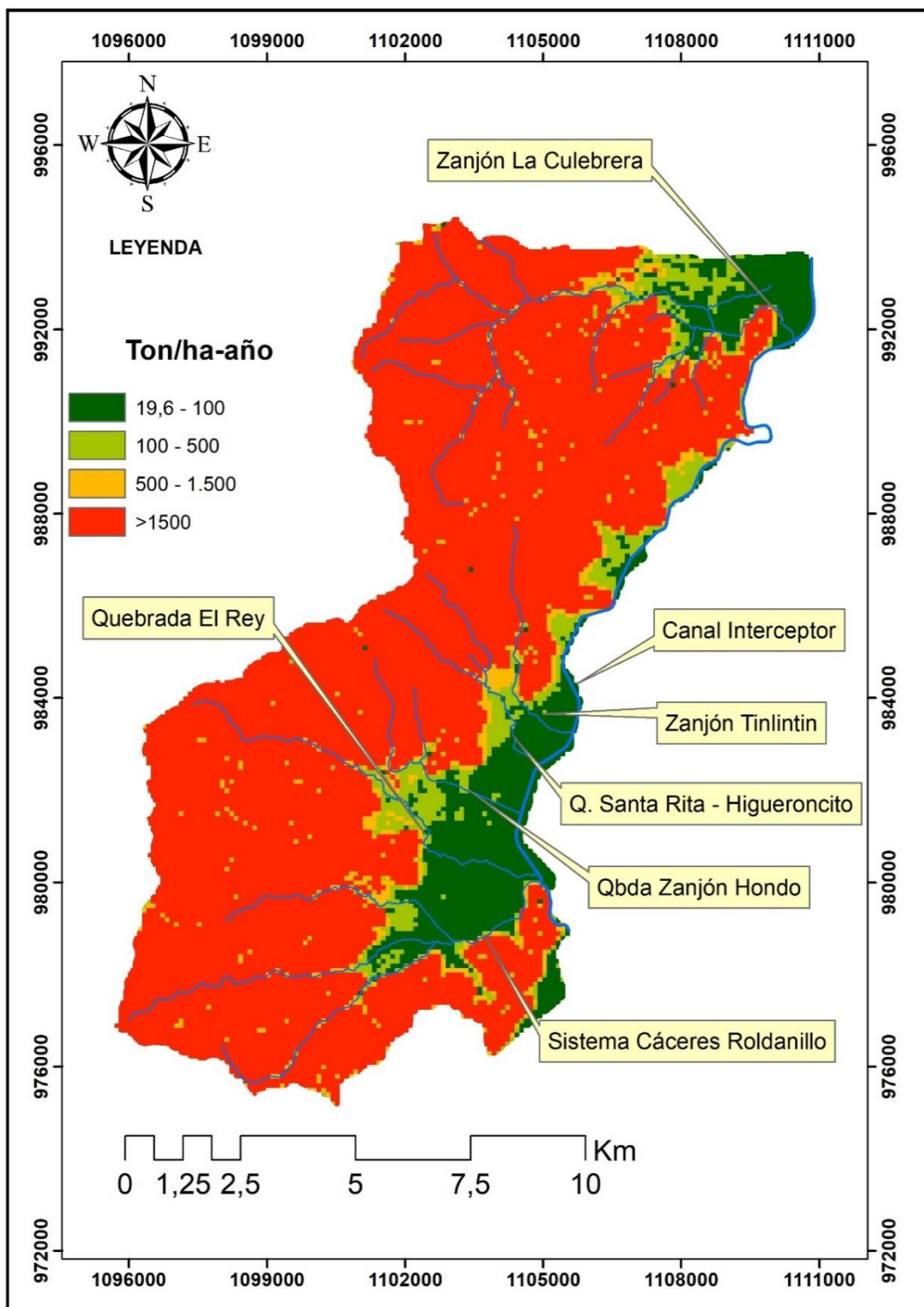


Figura 29. Mapa de erosión potencial en zona de estudio.

5.7. EROSIÓN REAL EN ZONA DE ESTUDIO

De acuerdo con los términos de la ecuación universal de pérdida de suelos, en la determinación de la erosión actual intervienen los factores lluvia (R), suelo (K), topográfico (L.S), cobertura de suelo (C); el factor de manejo de suelos (P) se considera con valor unitario. La superposición (multiplicación) de mapas temáticos permitió establecer que la erosión actual en la zona de estudio se encuentra concentrada en los rangos entre moderada a ligera, con valores entre 51.66% y 40.27% del área respectivamente; en términos de erosión actual en la zona de estudio, se encuentra que el 91.93% del área de estudio se encuentra en el rango entre 0 y 100 ton/ha/año. La Tabla 25 resume la clasificación de la erosión actual, los rangos de erosión, el área y los porcentuales de área asociados.

Tabla 25. Clasificación de la Rangos de erosión real, rangos y áreas en zona de estudio

Clasificación de la erosión actual en zona de estudio	Rango de erosión (Ton/ha/año)	Área (ha)	% Área
Ligera	< 20	5667.61	40.275
Moderada	20 – 100	7270.19	51.663
Fuerte	100 – 300	1120.12	7.960
Severa	>300	14.37	0.102
TOTAL:		14072.29 ha.	100.0 %

Esta degradación de suelo se concentra con mayor intensidad en las áreas de drenaje de las quebradas Cáceres - Roldanillo, quebrada El Rey, quebrada Zanjón Hondo y Zanjón La Culebrera; respecto a las quebradas Santa Rita – Higuieroncito y Zanjón Tilintín, presentan áreas muy marcadas por erosión real, sin embargo, por la menor longitud de las corrientes, y menor área de drenaje, la erosión actual presenta menor magnitud de degradación (Figura 30). El 91.93% del área presenta erosión entre ligera a moderada. Se observa correspondencia con los aportes de sedimento en el tramo crítico al canal interceptor.

5.7.1. Estimación de la erosión neta en zona de estudio

Estimar la erosión neta ocurrida a nivel de una cuenca hidrográfica, significa medir variables como pérdida de suelo o acumulación de sedimentos. Mientras más extensa es el área de influencia, menor es la precisión obtenida, en razón a que los procesos erosivos están sujetos a cambios en las tasas de transporte y deposición de sedimentos (García-Chevesich, 2008; Morgan, 2005; Terrance et al., 2002).

Por muy exacta que sea la recolección de datos, resulta extremadamente difícil determinar con exactitud la erosión ocurrida en un área dada, debido a la alta variabilidad espacial y temporal de los procesos erosivos, así como de los factores que lo afectan. Para una misma área y bajo condiciones similares de precipitación, pendiente, vegetación, etc., se pueden medir tasas de erosión completamente distintas en dos o más lluvias sucesivas. Esto se explica por la deposición y la disponibilidad de sedimentos variables que cambian constantemente (García-Chevesich, 2008; Hudson, 1993).

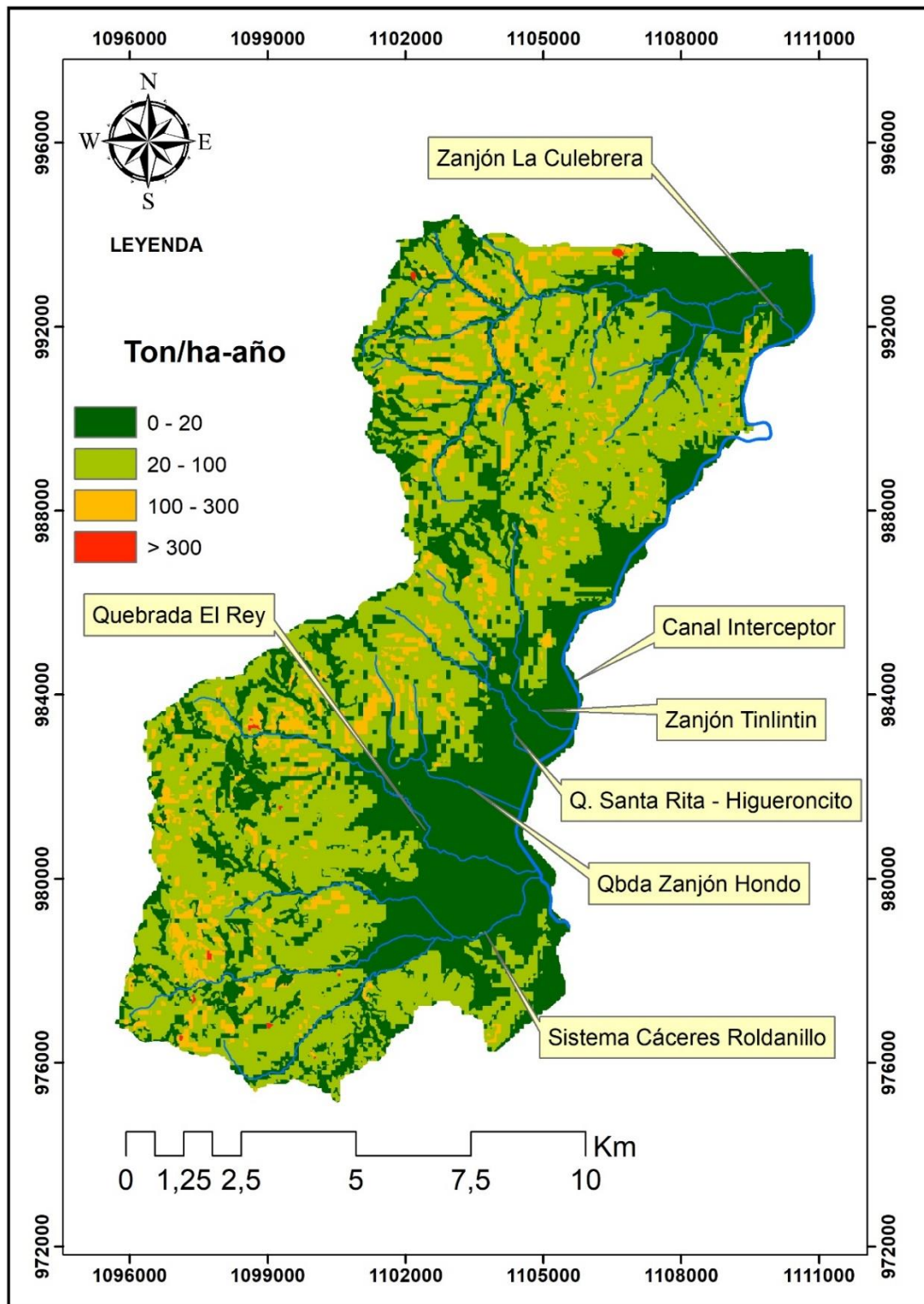


Figura 30. Erosión **real** en zona de estudio

La medición de la erosión y la sedimentación a nivel de cuencas hidrográficas se puede determinar mediante dos métodos, estimando los sedimentos en suspensión para correlacionarlos con el caudal, y midiendo la deposición de sedimentos en sectores específicos. La sedimentación producida en una cuenca, considerando la totalidad de los procesos de erosión y deposición, está representada por la cantidad de sedimentos que abandonan el área de drenaje a través de la corriente principal en un periodo de tiempo dado (Unesco, 2010).

Para estimar tasas netas de erosión y sedimentación en la zona de estudio, por carencia de información, se descarta la primera opción basada en el uso de curvas de caudal vs. Sedimentos en suspensión; de manera que se recurre a la segunda opción, la cual trata de estimar sedimentos en donde la velocidad del caudal disminuye a tal punto que ocurre deposición, caso canal interceptor del Distrito RUT. El flujo en cero, esto sucede cuando se opera las tres (3) compuertas de control del canal interceptor, los sedimentos en suspensión se depositan en función del tiempo de permanencia hacia el fondo del canal.

En principio, para una adecuada estimación, resulta fundamental conocer los niveles topográficos de los sedimentos depositados antes y después del período de tiempo en estudio. Además, es importante realizar las mediciones en los mismos puntos, pues la variabilidad espacial es un factor que debe omitirse. El canal en estudio se puede dividir en transeptos de medición, en los cuales se determinará, cada cierto intervalo, la distancia entre el fondo del canal y la superficie de sedimentos, así como la distancia a la superficie del agua y la línea imaginaria que une ambos extremos del transepto (Figura 31). Finalmente se debe considerar la densidad de los sedimentos, mediante un muestreo aleatorio, determinando su variabilidad (Unesco, 2010).

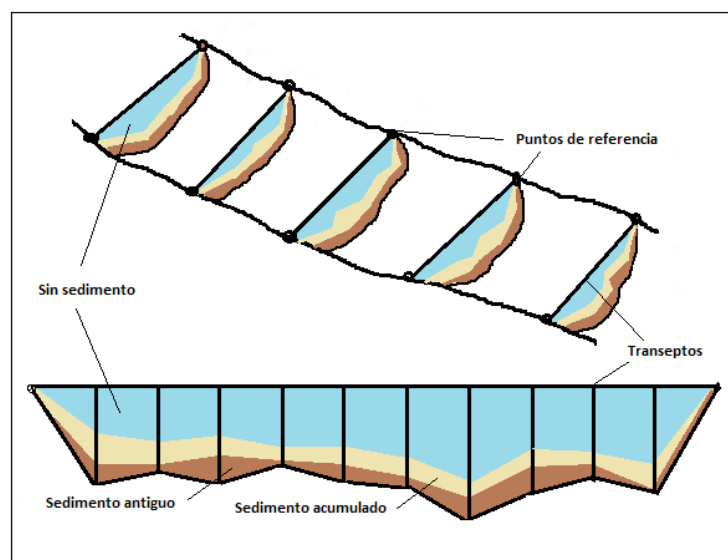


Figura 31. Esquema para determinación de sedimento acumulado en el fondo de un canal

(Adoptado de García-Chevesich, 2008).

Es importante tomar en cuenta que cerca del 90% del peso total de los sedimentos transportados en un curso de agua viajan en forma de suspensión, por lo tanto, si se enfoca sólo en el material que se arrastra, solamente se estará estimando una porción de la erosión total. La mayoría de los estudios de modelación en erosión se enfocan en el transporte de material de arrastre (Unesco, 2010).

Sobre la base de las anteriores experiencias, la estimación neta de erosión y sedimentación depositada en el tramo de canal, asociada a la zona de estudio, se presenta en la Tabla 26.

Tabla 26. Rangos calculados de erosión real, áreas y volumen neto de sedimentos anuales en zona de estudio

Clasificación de la erosión real en zona de estudio	Rango de erosión (ton/ha/año)	Área (ha)	Ton/año	Densidad húmeda Ton/m ³	Volumen sedimentos en canal m ³ /año
Ligera	< 20	5,668	56,676	1.7	3,334
Moderada	20 – 100	7,270	363,510	1.9	19,132
Fuerte	100 – 300	1,120	224,024	1.7	13,178
Severa	>300	14	4,311	1.6	269
Total:		14,072	648,521		35,913

5.8. EROSIÓN POTENCIAL EN ZONA CRÍTICA.

Las operaciones de dragado y mantenimiento del canal interceptor del Distrito RUT, se realizan de manera regular entre los kilómetros 25 a 30, de manera que la información suministrada y disponible se enfoca en los cursos de agua que tributan sus caudales líquidos y sólidos en 5 kilómetros de canal interceptor. El procedimiento para la determinación potencial en zona crítica es el mismo que se aplicó en la zona de estudio, solamente se corta mediante análisis espacial el área de drenaje que no está asociada a los 5 kilómetros de recorrido del canal interceptor, se trata de la exclusión del área de drenaje de la quebrada Zanjón La Culebrera.

Como se aclaró anteriormente, el mapa temático de erosión potencial en zona crítica, permite observar la degradación del suelo por efecto de la erosión bajo el supuesto de cero cobertura, o sea suelo completamente desprotegido. El mapa temático aparece ilustrado en la Figura 32, y los resultados de rangos de erosión potencial en zona crítica y áreas asociadas se resumen en la Tabla 27.

Tabla 27. Clasificación de la erosión potencial, rangos y áreas en zona crítica.

Clasificación de la erosión potencial En zona crítica	Rango de erosión (Ton/ha/año)	Área (ha)	% Área
Ligera	< 100	1304.93	13.35
Moderada	100 – 500	622.70	6.37
Fuerte	500 – 1500	446.18	4.56
Severa	>1500	7401.46	75.72
TOTAL:		9775.27	100.0 %

La erosión potencial en rango de severa es la predominante en el territorio, fenómeno de degradación que alcanzaría un 75.72% del área total de la zona crítica, le sigue en magnitud el componente de erosión ligera, el cual ocurre en la planicie con un 13.35% del área total.

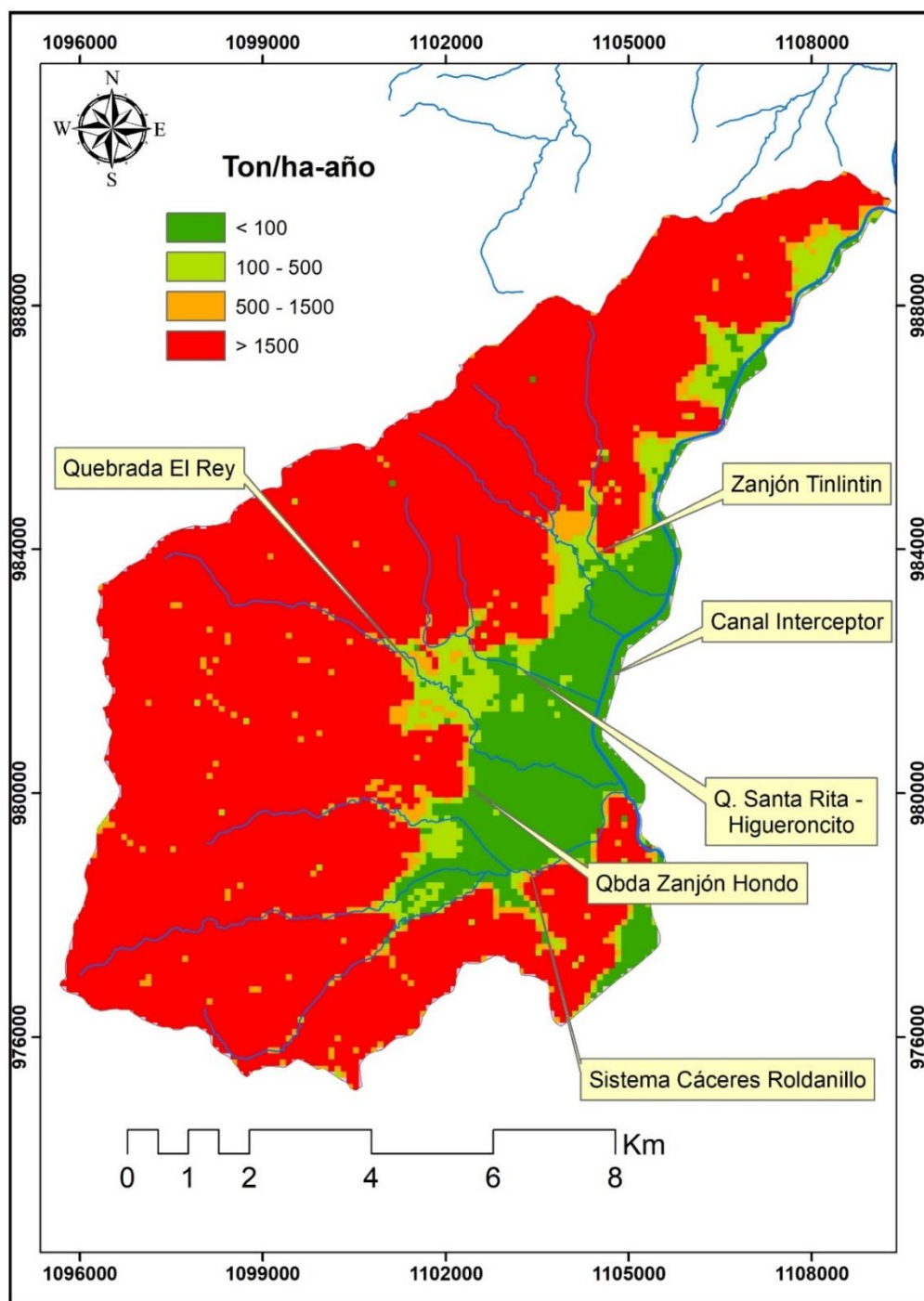


Figura 32. Mapa de erosión potencial en zona crítica

5.9. EROSIÓN REAL EN ZONA CRÍTICA.

A partir del mapa temático de erosión potencial en zona crítica, mediante la superposición (multiplicación) del plano anterior y el plano del factor de cobertura vegetal correspondiente a la condición actual, se genera el plano temático de erosión real en zona crítica (Figura 33). El 93% del área de interés se encuentra definida entre los rangos ligera a moderada, significa que el 7% restante del área se encuentra afectada por erosión fuerte a severa. La distribución porcentual de área según rangos de erosión real aparece en la Tabla 28.

Tabla 28. Clasificación de la erosión real, rangos y áreas en zona crítica.

Clasificación de la erosión real en zona crítica	Rango de erosión (Ton/ha/año)	Área (ha)	% Área
Ligera	< 20	4151.33	42.47
Moderada	20 – 100	4939.49	50.53
Fuerte	100 – 300	675.81	6.91
Severa	>300	8.63	0.09
TOTAL:		9775.26	100.0 %

Como se describió anteriormente, no toda la erosión de la cuenca se transporta hacia aguas abajo, parte del material queda en bacines y depósitos superficiales y otra parte fluye en los cursos de agua que tributan hacia el canal interceptor; en función de la velocidad del agua en el canal, una porción de sedimentos se depositará en el fondo del canal y otra porción continuará el recorrido hacia aguas abajo del canal interceptor. El volumen de sedimentos en el canal interceptor se resume en la Tabla 29.

Tabla 29. Rangos de erosión real, áreas y volumen neto de sedimentos anuales en zona crítica

Clasificación de la erosión real en zona crítica	Rango de erosión (ton/ha/año)	Área (ha)	Ton/año	Densidad húmeda Ton/m3	Volumen sedimentos en canal m3/año
Ligera	< 20	4,151	41,513	1.7	2,442
Moderada	20 – 100	4,939	246,975	1.9	12,998
Fuerte	100 – 300	676	135,162	1.7	7,950
Severa	>300	9	2,589	1.6	161
Total :		9,775	426,239		23,553

Es importante resaltar que la sedimentación actual que ocurre en el tramo de 5 km., se origina principalmente a partir de dos fuentes básicas: de las aguas del río Cauca y de las vertientes del Sistema Cáceres-Roldanillo, quebrada Zanjón Hondo, quebradas Santa Rita-Higueroncito y Zanjón Tinlinton; las aguas provenientes del río Cauca se caracterizan principalmente por contener sedimentos en suspensión, situación que se ve alterada por la presencia de compuertas y la lentitud con que fluye el agua en el canal, esta condición contribuye a integrar más sedimentos de arrastre en el fondo del canal interceptor, en proporciones aún desconocidas.

Se presume que la mayor aportación de sedimentos hacia el canal interceptor tendría su origen principal en las vertientes de la cuenca RUT; por su parte, las aguas provenientes

del río Cauca, se transportan inicialmente a través del canal conductor el cual trabaja como un sedimentador, y parte de sus aguas continúan hacia el canal 1.0. Lo anterior reviste alta importancia porque el tramo inicial del canal conductor no evidencia los volúmenes de sedimentos que se depositan en el canal interceptor.

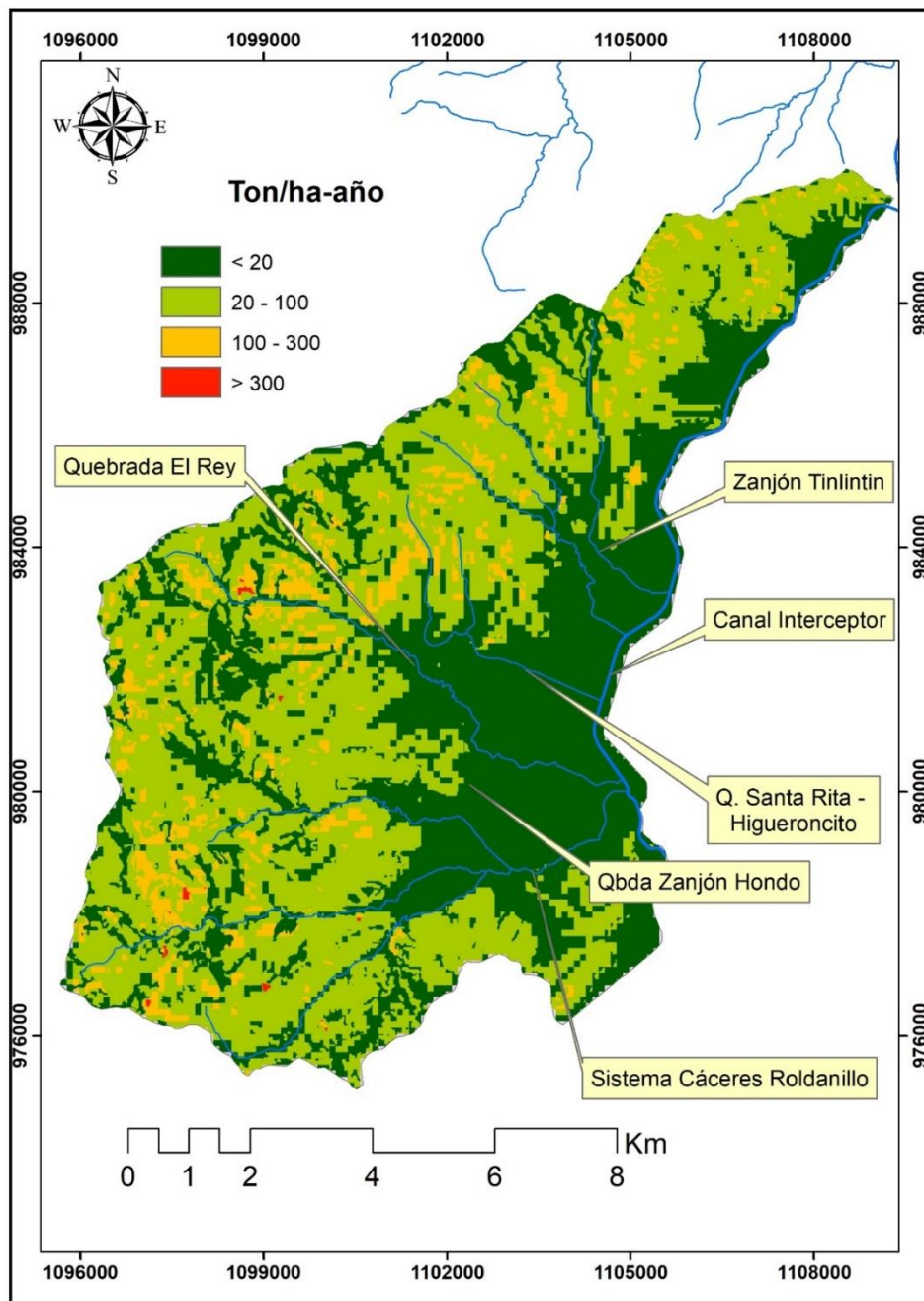


Figura 33. Mapa de erosión actual en zona crítica (5 km).

5.10. EFECTOS DE LA COBERTURA VEGETAL EN ZONA CRÍTICA

Para estimar los efectos que produce la cobertura vegetal en la producción de sedimentos en el canal interceptor, se plantean cuatro escenarios de simulación de cobertura vegetal para aplicar de manera homogénea en la denominada zona crítica. Se refiere específicamente a aumentos de cobertura vegetal del orden del 10%, 20%, 40% y 60% respectivamente. También se adiciona un quinto escenario condicionado por cobertura y pendiente, donde la prioridad de cobertura es igual o mayor a 0.16 pero al mismo tiempo, el factor topográfico L.S es mayor a 3%. En total resultan cinco escenarios de simulación.

Las coberturas por encima del factor C igual o mayor a 0.16, básicamente están representados por la mayoría de los cultivos tradicionales en la zona de planicie. Los resultados de la superposición de mapas de erosión real y cada una de las condiciones de cobertura vegetal indicadas, se resumen en la Tabla 30 en términos de rangos de áreas, y en la Tabla 31 en términos de porcentajes de área.

Tabla 30. Resultados de simulación de escenarios de efectos de cobertura vegetal sobre erosión real, en áreas.

Clasificación de la erosión real en zona crítica	Rango de erosión (Ton/ha/año)	Erosión Actual	ESCENARIOS				
			1 (10%)	2 (20%)	3 (40%)	4 (60%)	5 (40%) C≥0.16 S>3%
		Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Ligera	< 20	4151.33	4214.92	4529.21	5292.13	6323.59	4556.23
Moderada	20 – 100	4939.49	4938.15	4684.98	4345.94	3437.93	5032.25
Fuerte	100 – 300	675.81	616.31	555.19	133.14	13.59	182.73
Severa	>300	8.63	5.88	5.88	4.05	0.15	4.05
TOTAL:		9775.26	9775.26	9775.26	9775.26	9775.26	9775.26

Para los cuatros escenarios de simulación con cobertura vegetal homogénea: se observa que a medida que aumenta el porcentual de área de cobertura vegetal, se reducen significativamente los rangos de erosión, concentrándose en los rangos de erosión moderada y ligera, esto significa que al intervenir 9775.26 ha. se presenta una mejora en las condiciones de erosión de los suelos. El quinto escenario, representa un ejemplo de priorización, la intervención sólo se hace en 2,983.38 ha, representa las áreas que cumplen la condición establecida, y se consiguen mejores resultados en atención al costo.

Tabla 31. Resultados de simulación de escenarios de efectos de cobertura vegetal sobre erosión real, en porcentajes de áreas.

Clasificación de la erosión real en zona crítica	Rango de erosión (Ton/ha/año)	Erosión Actual	ESCENARIOS				
			1 (10%)	2 (20%)	3 (40%)	4 (60%)	5 (40%) C≥0.16 S>3%
		Área (%)	Área (%)	Área (%)	Área (%)	Área (%)	Área (%)
Ligera	< 20	42.47	43.12	46.33	54.14	64.69	46.61
Moderada	20 – 100	50.53	50.52	47.93	44.46	35.17	51.48
Fuerte	100 – 300	6.91	6.30	5.68	1.36	0.14	1.87
Severa	>300	0.09	0.06	0.06	0.04	0.00	0.04
TOTAL:							

Las Figuras 34 y 35 representan los resultados de la simulación de coberturas, escenarios homogéneos y uno priorizado, tanto en áreas como en porcentajes de áreas.

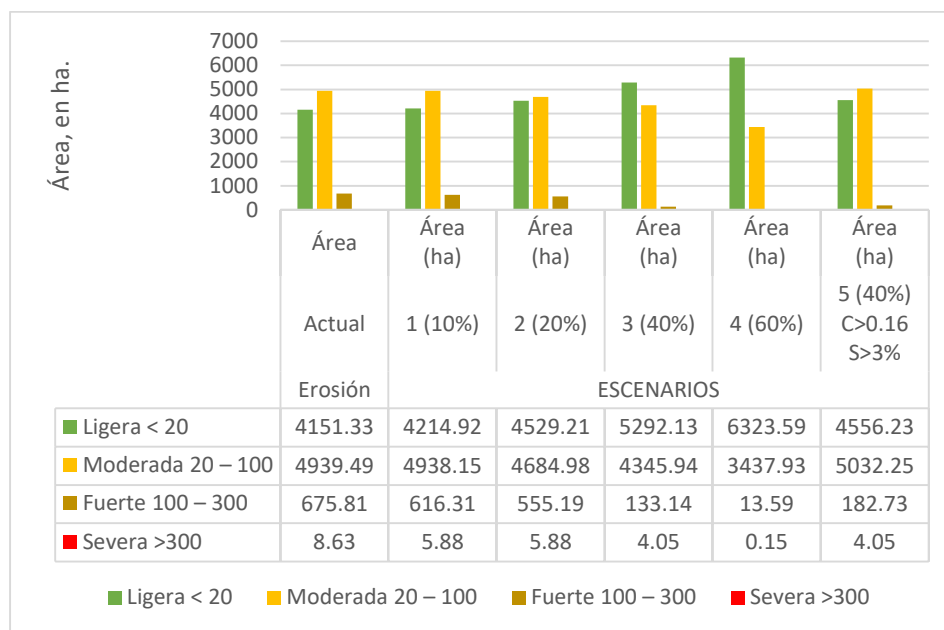


Figura 34. Simulación de coberturas, escenarios homogéneos y uno priorizado, en áreas.

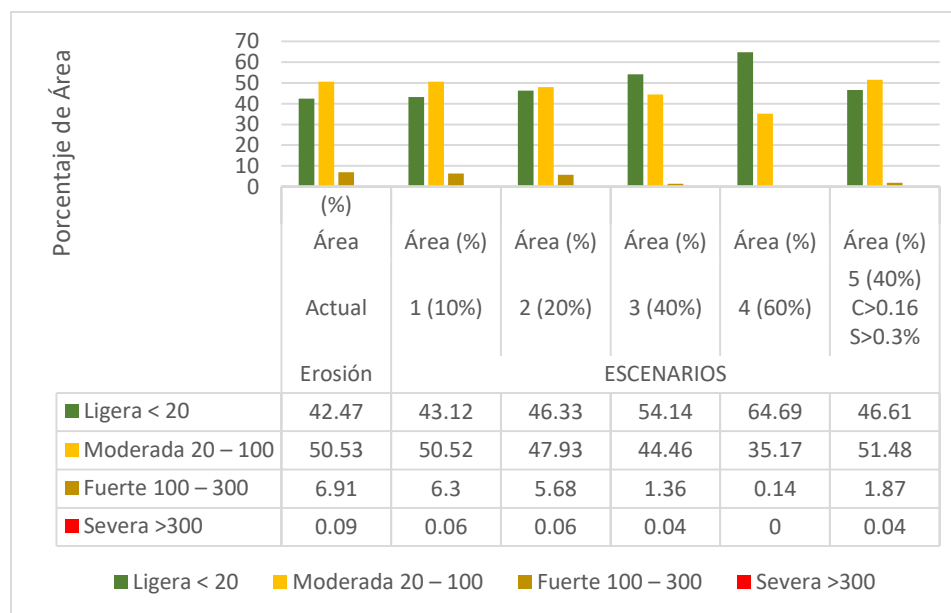
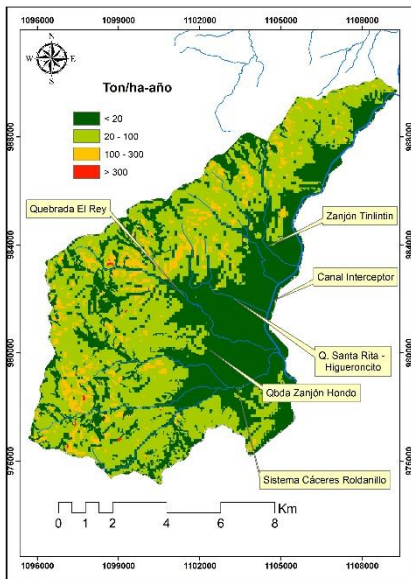
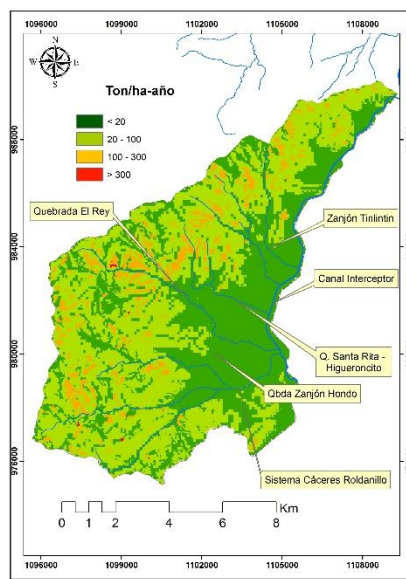


Figura 35. Simulación de coberturas, escenarios homogéneos y uno priorizado, en porcentajes de áreas.

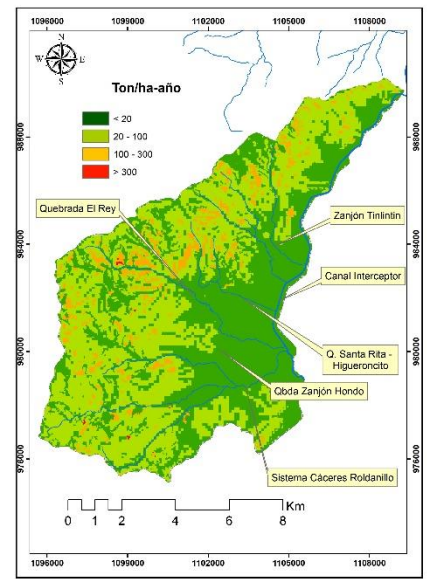
Se presentan a continuación cinco imágenes que representan los mapas temáticos, resultados de los efectos del aumento de cobertura vegetal, en referencia a cada uno de los escenarios planteados, Figura 36.



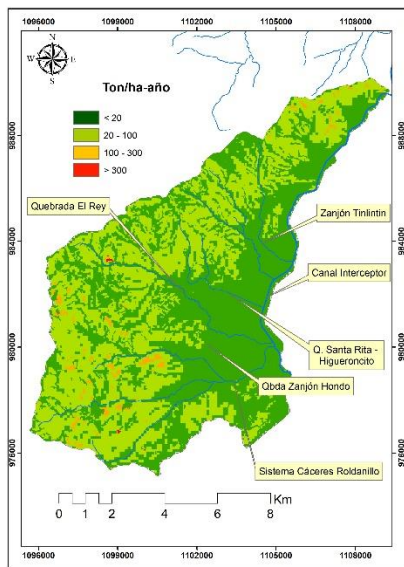
Escenario Línea base



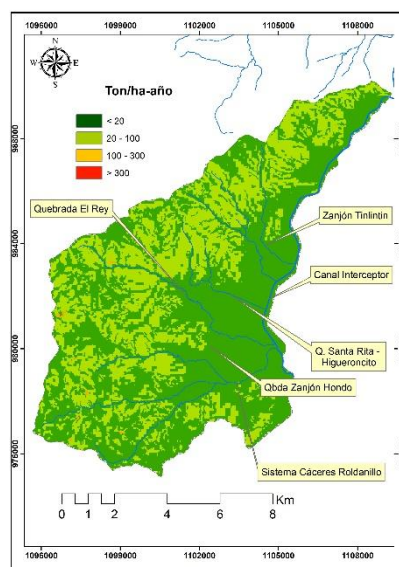
Escenario 1 (10%)



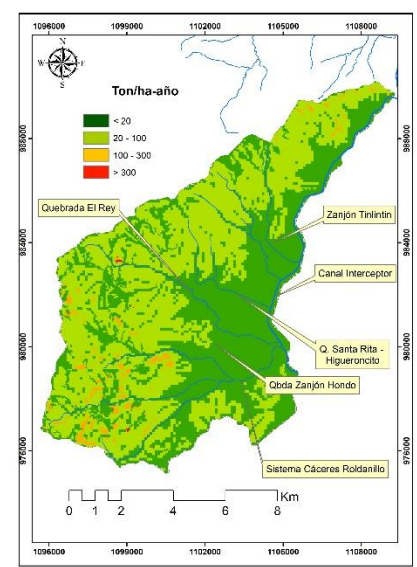
Escenario 2 (20%)



Escenario 3 (40%)



Escenario 4 (60%)



**Escenario 5 (40%,
C≥0.16, S>3%)**

Figura 36. Línea base y escenarios de erosión hídrica

5.11. EFECTOS DE LA COBERTURA VEGETAL EN EL VOLUMEN DE SEDIMENTOS EN EL CANAL INTERCEPTOR EN ZONA CRÍTICA.

Sobre la base de los resultados anteriores se procedió a obtener los volúmenes de sedimentos que se depositan en el canal interceptor, se trata del material de arrastre o azolves en el trayecto de 5 km. de longitud. Para la condición de la línea base y para cada uno de los cinco (5) escenarios, se resumen los resultados en la Tabla 32, también se puede apreciar los efectos del cambio de cobertura vegetal en la Figura 37.

Tabla 32. Resumen de volúmenes de sedimentos en canal interceptor para cada uno de los escenarios aplicados en zona crítica.

Clasificación de la erosión real en zona crítica	Rango de erosión ton/ha/año	ESCENARIOS Y VOLUMENES DE SEDIMENTACIÓN EN CANAL INTERCEPTOR, en m ³					
		Erosión actual	1 (10%)	2(20%)	3(40%)	4(60%)	5(40%) C≥0.16 S>3%
Ligera	< 20	2,442	2,479	2,664	3,113	3,720	2,680
Moderada	20 – 100	12,998	12,995	12,328	11,437	9,047	13,243
Fuerte	100 – 300	7,950	7,250	6,532	1,566	160	2,150
Severa	>300	161	110	110	76	3	76
Total :		23,553	22,834	21,634	16,192	12,930	18,149

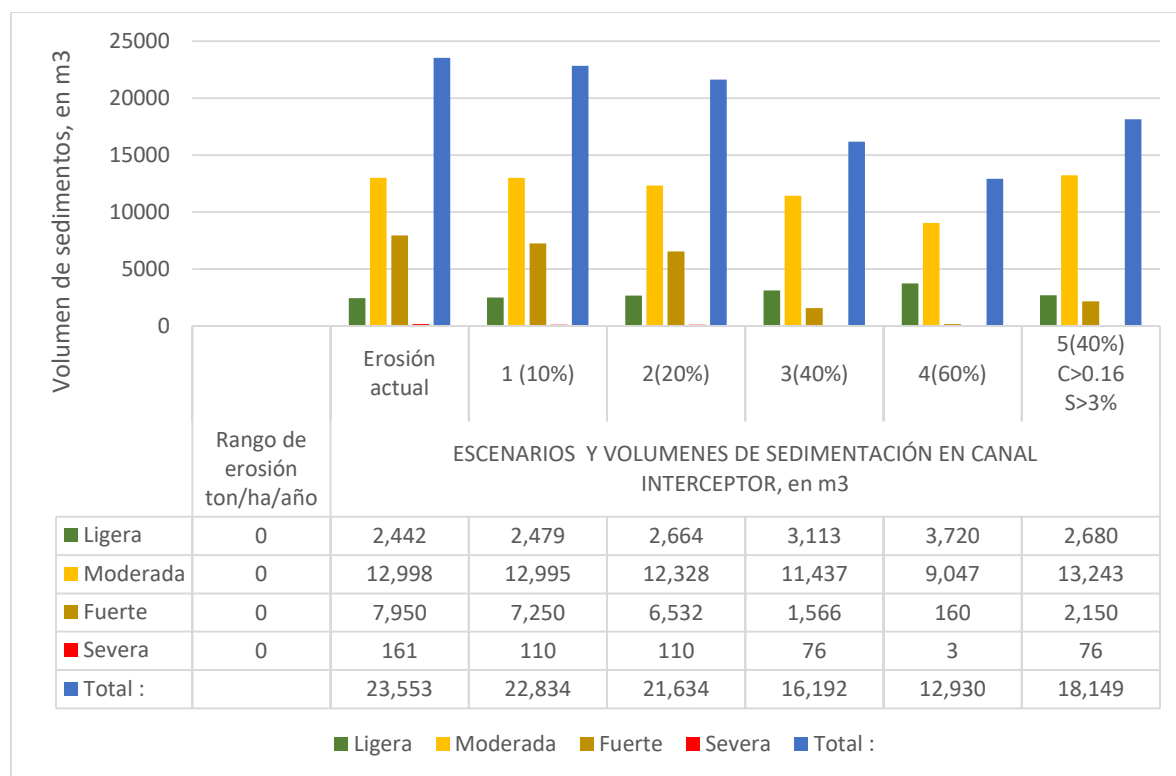


Figura 37. Escenarios y Volúmenes de sedimentación en canal interceptor – zona crítica.

5.12. FACTOR P - MANEJO DEL SUELO

Las buenas prácticas agrícolas son fundamentales en la conservación de los suelos, por lo tanto, a nivel de aproximación, se recurre a los valores tabulados del Factor P (Tabla 7) propuestos por Wischmeier y Smith, referentes a rangos de pendiente y asociados a trabajos a nivel; se trata de adicionar un sexto escenario, de carácter hipotético, con el fin de observar la sensibilidad de respuesta con la aplicación del Factor P, en términos de reducción de volúmenes de sedimentos en el canal de drenaje. Figura 38.

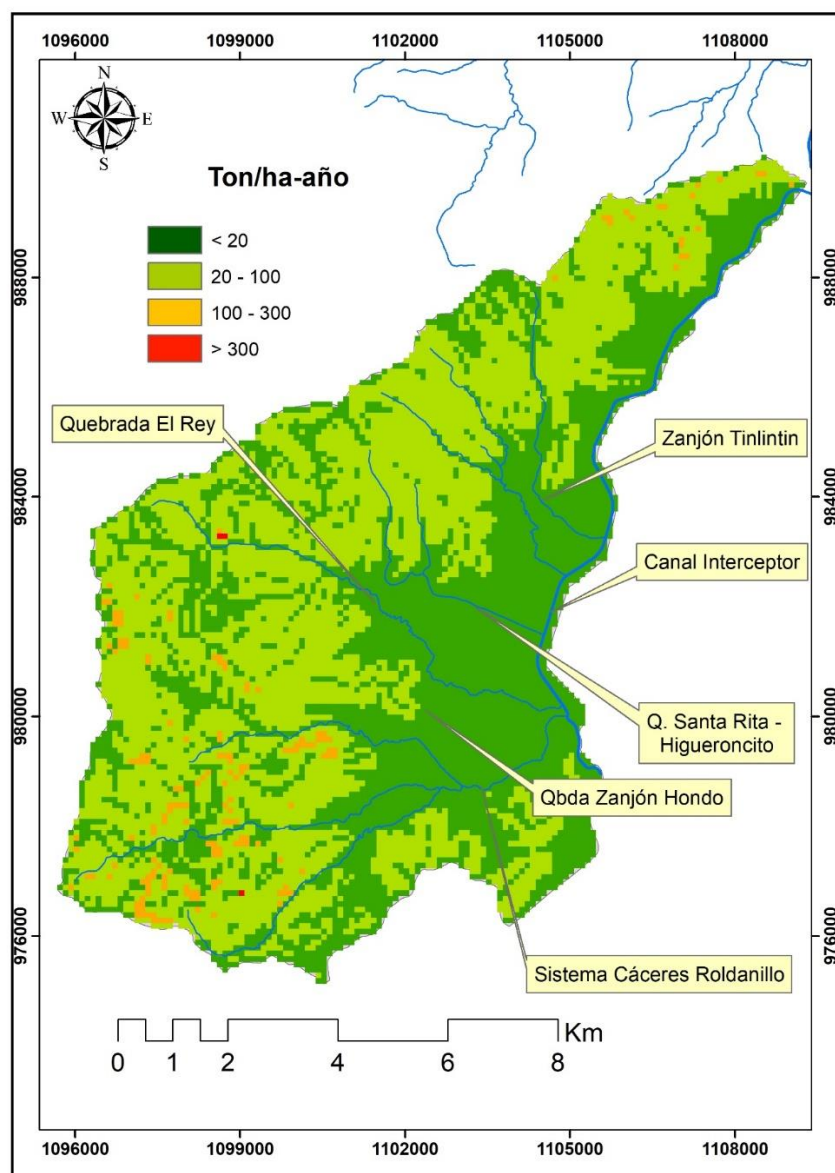


Figura 38. Zona crítica – aplicación del factor P.

Con base en los resultados del análisis espacial de la erosión, obtenidos con la aplicación del Factor P, se elabora la Tabla 33 la cual permite observar los resultados en términos de áreas afectadas por erosión, igualmente se construye la Tabla 34, la cual representa los valores comparativos de volúmenes de sedimentos depositados en el canal interceptor entre la condición de la línea base, el escenario 5 y 6 respectivamente.

Tabla 33. Comparativo línea base y escenarios 5 y 6 en términos de áreas afectadas en zona crítica.

Clasificación de la erosión actual en zona crítica	Rango de erosión (Ton/ha/año)	Erosión Actual	Escenarios	
			5 (40%) **	6 (factor P)** Manejo de suelos
		Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Ligera	< 20	4151.33	4556.23	4609
Moderada	20 – 100	4939.49	5032.25	5036
Fuerte	100 – 300	675.81	182.73	127
Severa	>300	8.63	4.05	3
TOTAL:		9775.26	9775.26	9775

**.: Área intervenida en 2,983.38 ha

Tabla 34. Comparativo línea base y escenarios 5 y 6 en términos volúmenes de sedimento en canal interceptor.

Clasificación de la erosión actual en zona crítica	Rango de erosión (Ton/ha/año)	Erosión Actual	ESCENARIOS Y VOLUMENES DE SEDIMENTACIÓN EN CANAL INTERCEPTOR, en m ³	
		Área actual	5 (40%) **	6 (factor P)** Manejo de suelos
Ligera	< 20	2,442	2,680	2,711
Moderada	20 – 100	12,998	13,243	13,253
Fuerte	100 – 300	7,950	2,150	1,494
Severa	>300	161	76	56
TOTAL:		23,553	18,149	17,514

**.: Área intervenida en 2,983.38 ha

Un comparativo entre la línea base y los escenarios 5 y 6, permite establecer que los volúmenes de sedimentos en el canal interceptor, alcanzan una reducción entre un 23% y un 25.6%, escenarios asociados a una intervención en un área de 2,983.38 ha., mientras que la línea base la erosión actual está representada por un áreas de 9775.26 ha. La Figura 39 ilustra el resultado obtenido con la aplicación del factor P, en referencia a condición de erosión actual, la línea base, y los escenarios 5 y 6, en términos de volúmenes de aportación de sedimentos al canal interceptor.

Los azolves depositados en el canal interceptor tienen dos fuentes principales, el río Cauca y los cursos de agua que drenan en su costado occidental; su proporcionalidad en aportes es difícil de establecer, dado que los sedimentos en suspensión se combinan y se decantan por influencia directa de compuertas a lo largo de su recorrido. Las Estructuras hidráulicas actuales contribuyen al aumento de la tasa de sedimentación en el canal interceptor.

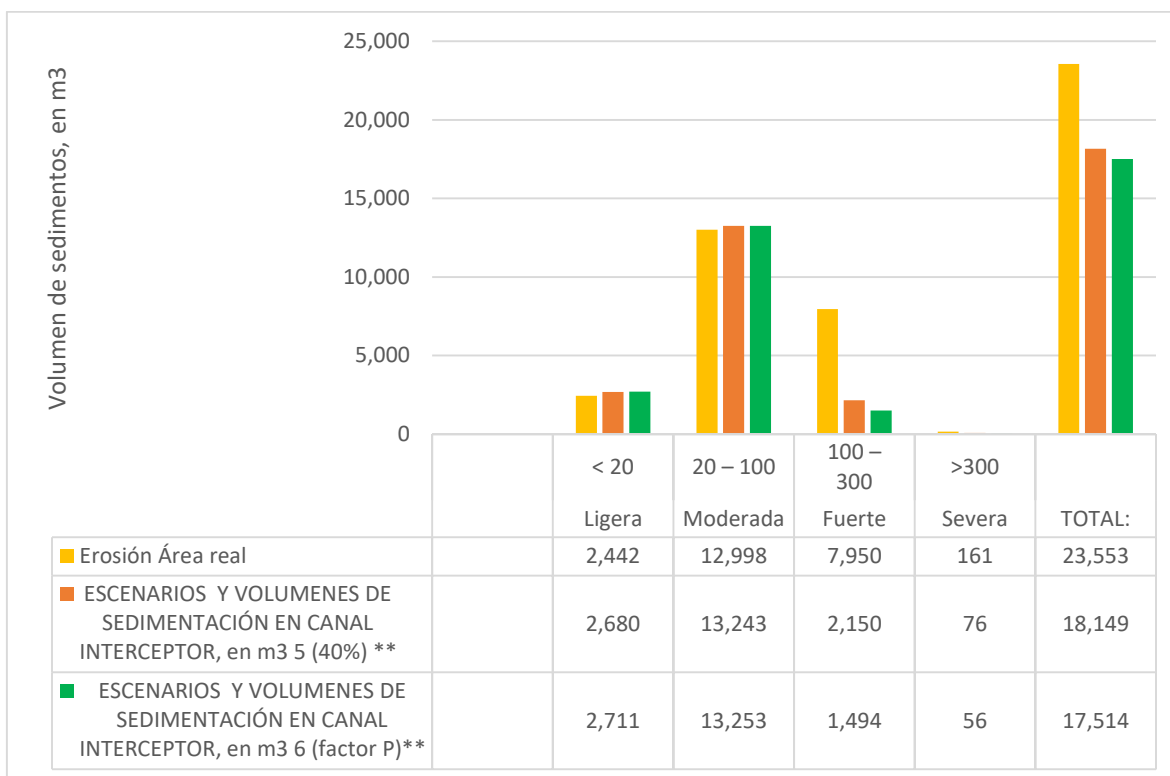


Figura 39. Aplicación del factor *P* en zona crítica – Volúmenes de sedimentos en línea base, y escenarios 5 y 6 - volúmenes de sedimento en m3.

5.13. ANÁLISIS GENERAL

El uso de las técnicas SIG y los resultados obtenidos demuestran su potencial en el análisis espacial y tratamiento de los factores que componen la ecuación universal de pérdida de los suelos (USLE). La precisión de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se encuentra en función de la cantidad y calidad de la información disponible, datos de campo que se espera alcancen, en tiempo cercano, el nivel de detalle requerido. Para mencionar algunos parámetros, se puede identificar el componente de materia orgánica de los suelos de ladera, información sobre porcentajes de suelos desnudos, matriz de raíces finas de los árboles, porcentaje de suelos desnudos con cobertura del dosel, y altura del dosel en coberturas leñosas o de protección permanente.

El factor *R* que representa el potencial erosivo de la lluvia, se sitúa en el rango de clase mediana, entre 1800 a 2600 MJ/ha*mm/hr, situación que responde a la ubicación geográfica de la zona de estudio, la cual se encuentra bajo un régimen de sotavento, o sea bajo la influencia de precipitación orográfica proveniente del pacífico colombiano. Valores de *R* altos son los que corresponden a rangos entre 3000 a 6000 MJ/ha*mm/hr, y muy altos los valores iguales o superiores a 6000 MJ/ha*mm/hr, de manera que el efecto de las lluvias sobre la zona de estudio es definitivamente de clase moderada. Otro aspecto importante a resaltar es la distribución de las curvas isoerodental, las cuales se acentúan en intensidad hacia los extremos sur y norte, y descienden en un 50% hacia la parte central del área de drenaje, situación que guarda armonía con los cambios de anchura de la cuenca.

Acerca de los resultados del factor K, es conveniente aclarar que se utilizó la información disponible de perfiles de unidades de suelos en zona de ladera y de zona plana en el área de estudio, y que corresponden a estudios elaborados por la CVC e IGAC; los datos de la zona de ladera, 4 perfiles, corresponden a un estudio semidetallado realizado en 2014 y publicado por CVC en un informe en 2016, mientras que los datos de la zona plana, 13 perfiles, corresponden a un estudio detallado y realizado en 2004 por CVC e IGAC. Se debe reconocer que la densidad de la información en la zona de ladera no es suficiente, que resulta necesario contar con un mayor número de perfiles, sin embargo la superposición de planos de clases y unidades de suelos de toda la jurisdicción territorial de la CVC, permitió una aceptable aproximación a la condición actual de los suelos de la cuenca y de la zona de estudio.

El factor topográfico no se puede modificar, se toma como un parámetro fijo con el cual se debe trabajar; los resultados surgen a partir de la base de un modelo digital de terreno, en conjunto con la definición de siete (7) rangos de porcentaje de pendiente, información que se procesó con tamaños de pixeles de 10 m x 10 m; el plano temático del factor topográfico permite establecer que el mayor rango porcentual de pendiente es el tipo muy ondulado, con un 48.64%, seguido del tipo ondulado con 11.77%, y escarpado y muy escarpado con 11.78%; en la clasificación de muy plano el 12.6% y plano 6.11% respectivamente. La anterior información, conduce a establecer que más de la mitad del área en estudio presenta un nivel de pendiente que favorece el proceso erosivo en la cuenca, y por tanto, esta condición potencia el transporte y deposición de sedimentos en zonas bajas, y por supuesto en el cuerpo del mismo canal interceptor.

La erosión real en la zona de estudio se encuentra concentrada en los rangos entre moderada a ligera, con valores de 51.66% y 40.27% del área respectivamente; el 91.3% del área de estudio se encuentra en el rango de erosión entre 0 y 100 ton/ha/año. La degradación de suelo se concentra con mayor intensidad en las áreas de drenaje de las quebradas Cáceres - Roldanillo, quebrada El Rey, quebrada Zanjón Hondo y Zanjón La Culebrera; las áreas de drenaje de las quebradas Santa Rita – Higueroncito y Zanjón Tilintín, presentan la menor afectación de degradación.

Respecto a la ausencia total de cobertura vegetal, o erosión potencial, los resultados indican que la mayor parte de la cuenca RUT presentaría erosión severa, con un 76.82% del área, seguido de un 12.53% de erosión ligera. Las zonas más bajas y próximas al canal interceptor podrían verter entre 19.6 a 100 ton/ha/año, mientras que las áreas medias y altas de la cuenca RUT, tienen un potencial de entrega superior a 1500 ton/ha/año.

La erosión actual en la zona de estudio comprende un área de 14,072 ha., con una producción estimada de 648,521 ton/año, parte se deposita en zonas bajas y parte fluye hacia el canal interceptor para un volumen de azolves equivalente a 35,913 m³/año.

Erosión actual en la denominada zona crítica. Las operaciones de dragado y mantenimiento del canal interceptor del Distrito RUT, se realiza de manera regular entre los kilómetros 25 a 30, de manera que la información suministrada y disponible se enfoca en los cursos de agua que tributan sus caudales líquidos y sólidos en 5 kilómetros de canal interceptor. La erosión potencial en rango de severa es la predominante, fenómeno de degradación que alcanzaría un 75.72% del área total de la zona crítica, le sigue en magnitud el componente de erosión ligera, el cual ocurre en la planicie con un 13.35% del área total.

Respecto a la erosión real en zona crítica, se tiene que el 93% del área se encuentra definida entre los rangos ligera a moderada, significa que el 7% restante del área se encuentra afectada por erosión fuerte a severa. La erosión real en la zona crítica cubre un área de 9,775 ha., con una producción estimada de 426,239 ton/año, parte se deposita en zonas bajas y parte fluye hacia el canal interceptor para un volumen de azolves equivalente a 23,553 m³/año.

Para determinar el efecto de la descarga de sedimentos en el canal interceptor, se plantearon cuatro escenarios de cobertura vegetal, los cuales se aplicaron de manera homogénea del orden del 10%, 20%, 40% y 60% en zona crítica, y se adicionó un quinto escenario priorizado por cobertura, igual o mayor a 0.16 y factor topográfico L.S mayor a 3 %. Respecto a los 4 escenarios, se observa una disminución significativa de los rangos de erosión, acentuándose entre los rangos de erosión moderada y ligera, con intervención total de 9775 ha., mientras que en el quinto escenario la intervención de cobertura se hace solo en un área de 2,983 ha; se establece entonces como la mejor opción la priorización de áreas, por alcanzar los mejores resultados en atención al costo.

Por ejemplo, la erosión ligera en la zona crítica pasa de un 42.47% en línea base y en el cuarto escenario se eleva al 64.69%, y en cuanto a la erosión moderada pasa del 50.53% al 35.17% en el cuarto escenario; respecto al quinto escenario, con intervención de un área menor, alcanza el 46.61% de erosión ligera y un 51.48% de erosión moderada. En términos de volúmenes de azolves en el canal interceptor, en línea base o de erosión real se depositan 23,553 m³, con el 10% de cobertura 22,834 m³, con el 20% de cobertura 21,634 m³, con el 40% de cobertura 16,192 m³, y con el 60% de cobertura 12,930 m³; en el quinto escenario se cubre el 40% de un área tres veces menor y alcanza una descarga de 18,149 m³.

Aparece un sexto escenario, de carácter hipotético, con el fin de observar la sensibilidad de respuesta con la aplicación del Factor P de manejo de suelos, para evaluar el efecto sobre los volúmenes de azolves en el canal interceptor. Un comparativo entre la línea base y los escenarios 5 y 6, permite establecer que los volúmenes de sedimentos en el canal interceptor, alcanzan una reducción entre un 23% y un 25.6%, escenarios asociados a una intervención en un área de 2,983.38 ha., mientras que la línea base la erosión real está representada por un áreas de 9775.26 ha. En términos de volúmenes de azolves, la línea base de erosión real produce una descarga de 23,553 m³, el escenario 5 produce una descarga de 18,149 m³, y finalmente con el sexto escenario la descarga se sitúa en 17,514 m³. Lo anterior, significa que la acción conjunta de la cobertura vegetal y el manejo de suelos en la denominada zona crítica puede lograr reducciones del 25.6% en la descarga de azolves en el canal interceptor, entre los kilómetros 25 a 30.

Los sedimentos en el canal interceptor provienen de dos fuentes principales, el río Cauca y de las corrientes de agua que descienden de la ladera de la cordillera occidental; en razón a la magnitud de las toneladas y volúmenes de sedimento encontrados, se podría afirmar que las corrientes tributarias al canal, son las que aportan la mayor proporción de sedimentos en el canal interceptor, sin embargo aún no existe evidencia para aceptar esta afirmación.

El costo de mantenimiento anual del canal interceptor se encuentra en función de tres componentes básicos: construcción de cajuela, acarreo de tierra y desazolve. El

dimensionamiento de la cajuela (sección y longitud) depende del valor del m^3 de excavación, y la cantidad de extracción se encuentra ligado al régimen anual de lluvias imperante en la zona, también responden a la altura del terraplén o “morro” que se va conformando en la distancia; el costo del acarreo de tierra está definido por el valor del flete y el número de viajes en volqueta; y el costo del desazolve depende directamente de la extracción de sedimento, m^3/km . No existe proporcionalidad entre los volúmenes de extracción y el costo del desazolve por kilómetro de canal, ya que el costo unitario depende de las variables antes mencionadas. La frecuencia e intensidad de las lluvias en la zona del distrito, en términos de eventos extremos, potencian la ocurrencia de caudales sólidos, y a su vez, disparan los costos de mantenimiento del canal interceptor. Por lo anterior, el costo de desazolve por km de canal es sensible al régimen de lluvias que ocurra en el lugar.

La aplicación de la metodología USLE, en un contexto SIG para una cuenca hidrográfica, en materia de resultados, tiene valiosos referentes a nivel global, se puede mencionar el caso de simulación espacio-temporal para una cuenca hidrográfica serrana ubicada en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, con la implementación de medidas conservacionistas, el rango asignado a alta erosión disminuyó su área en un 16%, estando ésta distribuida en rangos de menor erosión. Caso de simulación con resultados de reducción en la erosión hídrica, corresponde a la cuenca El Arroyo del lugar, en Guadalajara, España, logrado mediante mejora a metodología del factor topográfico; también se destacan experiencias similares en cuencas de México, Chile y Venezuela, y por supuesto en Colombia, cabe resaltar el trabajo desarrollado por la Corporación Autónoma Regional del Tolima, en el marco del Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas, caso cuenca mayor del río Totare, en éste trabajo se presentan resultados valiosos en materia de valores de cobertura vegetal permanente y de tierras agrícolas; estos valores se constituyen en verdaderos referentes nacionales, y lo más importante, armonizan con los resultados obtenidos de la cuenca RUT.

Como denominador común a escala global y local, con medidas conservacionistas se puede reducir la erosión hídrica, eliminar totalmente los rangos de erosión severa y alta, e incluso, disminuir en consecuencia rangos de erosión más bajos.

6. CONCLUSIONES

La modelación de la erosión hídrica a través de un sistema de información geográfica permitió conocer la localización espacial del fenómeno en la zona de estudio de la cuenca RUT, así como su nivel de afectación.

El uso de las técnicas SIG y los resultados obtenidos demuestran su potencial en el análisis espacial y tratamiento de los factores que componen la ecuación universal de pérdida de los suelos (USLE).

Se logró identificar que las variables intensidad de precipitación y coberturas vegetales inapropiadas responden con mayor intensidad al agravamiento del fenómeno de la erosión.

Se identificó una fuerte disminución del rango de erosión fuerte y severa en el área de estudio, situación que es favorecida por la implementación de cobertura en sitios de criticidad erosiva expresados en la situación actual, años 2012 a 2016.

Los resultados de los escenarios planteados indican que la mejor alternativa a seguir es establecer condiciones específicas para priorizar una intervención, en razón al logro de mejores resultados con menor costo al intervenir áreas más reducidas pero efectivas en respuesta a la degradación de los suelos.

7. RECOMENDACIONES

Se requiere mejorar la información de perfiles de unidades de suelos en zona de ladera en el área de estudio, información generada y suministrada por la CVC y por el IGAC.

La selección de las especies vegetales para recuperación de áreas degradadas debe ser abordada con la debida rigurosidad profesional. La disminución de los impactos ambientales por causa de la erosión hídrica se puede mitigar a través del establecimiento de vegetación apropiada, en armonía con las condiciones agrológicas de los suelos, la fisiología y morfología de las plantas, y la respuesta de las coberturas a condiciones extremas.

Para una adecuada estimación de sedimentos se debe identificar un tramo de canal, dividirlo en transeptos, medir niveles topográficos antes y después de un periodo de tiempo, mediciones en los mismos puntos, y considerar la densidad de los sedimentos mediante muestreo aleatorio, determinando su variabilidad.

Es necesaria la implementación de medidas conservacionistas en las áreas críticas afectadas por erosión hídrica superficial en las áreas de drenaje de las quebradas Cáceres-Roldanillo, Quebrada Rey, Quebradas Santa Rita-Higueroncito, Zanjón Tinlinton, y Zanjón La Culebrera, con el objetivo de contener y evitar la remoción del suelo.

8. REFERENCIAS

- Almorox et al. (1994).- Métodos de estima de la erosión hídrica. Editorial agrícola española, 152 pp.
- Antezana C., J.C. (2001). Aproximación de riesgo por erosión hídrica aplicando un sistema de información geográfica en la subcuenca Shambillo, Distrito de Padre Abad1. México.
- Arnold, J.G., Williams, R.H. Griggs, and N.B. Sammons. (1991). SWRRBWQ – A Basin Model for Assessing Management Impacts on Water Quality. Draft. USDA. ARS, Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Temple, TX.
- Barrios R., A. y Quiñonez E. (2000). Evaluación de la erosión utilizando el modelo R(USLE) con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca en los Andes venezolanos. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Rev. Forest. Venez. 44 (1), 65-71.
- Cortolima (2005). Erosión Hídrica en la Cuenca Mayor del río Totare a través de la Ecuación Universal de Pérdida de suelos (USLE - MUSLE). 820-852pp.
- Cruz G., M. (2008). Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los Modelos RUSLE y USPED. Aplicación al arroyo del lugar, Guadalajara (España). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- CVC (2017). Información hidroclimatológica.
- CVC (2017). Mapas temáticos georreferenciados. Valle del Cauca.
- Foster, G.R. 2005. Revised Universal Soil Loss Equation Versión 2 (RUSLE2). Science Documentation USDA - Agricultural Research Service. Washington, D.C. EEUU. 286pp.
- García-Chevesich, P. (2008). Procesos y control de erosión. Outskirts Press. Denver, CO. 276 p.
- Hann, C. T. et al. (1994). Design Hydrology and Sedimentology for Small Cathments. Academic Press. San Diego, CA. USA. 588 p.
- Ibáñez A., S. et. al. (2007). El Factor C de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). Universidad Politécnica de Valencia.
- .
- Ibáñez A., S. et al. (2007). La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). Universidad Politécnica de Valencia
- IDEAM, U.D.C.A. (2015). Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia, 62 págs. Publicación aprobada por el IDEAM, Diciembre de 2015, Bogotá D.C., Colombia.
- IDEAM (2017). Bandas pluviográficas estación Isugu, periodo 2012 a 2016.
- Kirkby, M.J. y Morgan, R.P.C. 1984. Erosión de suelos. Editorial Limusa, México. 375pp.

Marchamalo, M. (2007). Cuantificar el potencial de conservación de suelo y agua basado en un análisis territorial de la cuenca. Estudio de caso de la cuenca del río Birrís. Proyecto: Contribución a la política de pago por servicios hidrológicos para el sector hidroeléctrico de Costa Rica. Primer Informe. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 174pp.

McCool, D.K. & Renard, K.G. (1990). Water erosion and water quality. *Advances in Soil Sciences*, 13, 174-185.

Morales A., M.C. (2014). Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la unidad hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du-Haiti. Escuela de Posgraduados de Turrialba.

Morgan, R. (1997). Erosión y conservación del suelo. Ediciones Mundi Prensa.

Morgan, R. (2005). Soil erosion and conservation. National Soil Resources Institute. Cranfield University. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK. 304 p.

Municipio de Roldanillo (2000). Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Roldanillo. Subsistema Biofísico, Plan de Ordenamiento Territorial, Documento 1, Diagnóstico Territorial.

Neitsch, S.L; J.G. Arnold, J.R. Williams. (1999). Soil and Water Assessment Tool User's manual. Version 98.1. Grassland, Soil and Water research Laboratory. Agricultural Research Service – Blackland Research Center. Texas Agricultural Experiment Station.

Onrubia Sobrino E. (2001). Desarrollo de Modelos de Erosión y Aplicaciones con Modelos Digitales de Terreno. Trabajo Tutelado de Doctorado. Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Pérez G., Sandra. (2001). Modelo para determinar la erosión hídrica en Colombia utilizando Sistemas de Información Geográfica. Tesis de Especialización en Ingeniería Ambiental. Escuela de Ingeniería, Universidad Industrial de Santander, Bogotá.

Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Roldanillo (2000). Subsistema Biofísico, Plan de Ordenamiento Territorial, Documento 1, Diagnóstico Territorial.

Knisel, W.G. (1980). CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA, Conservation Research Report, No 26.640 p.

Ramírez O. F.A., Hincapié G., E.; Sadeghian K., S. Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas, CENICAFE, 2009.

Revilla, E.L. (2008). Estudio del Factor Vegetación "C" de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada "RUSLE" en la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. España.

Robredo S. (2007). Estimación de la erosión en la cuenca de recepción. Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid

Salazar M.I. et al. (2016). Propuesta para la declaratoria del Distrito Regional de Manejo Integrado RUT- Nativos. (Naturaleza, Ambientalismo, territorio, Identidad, Visión, Organización y Solidaridad).

Silva H., Javier (2015). Colombia se queda sin piel: erosión afecta a casi medio país. Periódico El Tiempo. 5 de mayo de 2015.

Silva, O. (2002). Evaluación de los componentes de erosión de los modelos EPIC y WEPP y de producción de agua del modelo SWAT en condiciones de sabana y altas pendientes. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Departamento de Agronomía. Maracay, Venezuela.

Srinivasan R; B.W. Byars and J.G. Arnold. (1996). SWAT/GRASS Interface users manual, versión 96.2. Soil and Water Reserach Lab. Blackland research Center. Temple, Texas. 41 p.

Tarbutck E. y Lutgens F. (1999). Ciencias de la tierra. Sexta edición. Prentice Hall, Madrid. España.

Terrence, J.; Foster, G.; Renard,K.(2002). Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. John Wiley and Sons. New York, NY. 338 p.

Unesco (2010). Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas, Documento Técnico No. 22. Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la oficina Regional de Ciencia para América Latina y el caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Urrutia C., N. (1984). Una Visión a la problemática del Distrito de Riego Roldanillo – La Unión y Toro. Univalle UNESCO.IHE –ASORUT.

Weshler, S.P. (2006). Uncertainties Associated with Digital Elevation Models for Hydrologic Applications: A Review. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 3, 2343-2384.

Williams, J.R; C.A Jones and P.T. Dyke. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and productivity. Trans. ASAE. 27 (1): 129-144.


Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA, Agriculture Handbook 537. Washington, EEUU. 69 pp.

Wischmeier W.H. y Smith D.D. (1965). Predicting rainfall-erosion loss from cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. USDA, Agriculture Handbook 282. Washington, EEUU. 49 pp.

9. ANEXOS


Anexo I: Perfil modal CVC - 186

Consociación: Vertic Argiustolls, franca fina, caolinítica, isotérmica; perfil modal CVC-186; símbolo MR024A. Morfología del perfil CVC-186 (Fotografía: Juan Pablo Fernández, 2016). Fuente: Levantamiento Semidetallado de suelos, Escala 1:25:000 Cuencas Cordillera Occidental, IGAC y CVC.

Perfil CVC-186	PROFUNDIDAD cm HORIZONTE	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
	00-18 cm Ap	Color en húmedo gris muy oscuro; textura franca; estructura en bloques subangulares, gruesos, medios y finos, fuertes; pH 6.0, reacción moderadamente ácida.
	18-68 cm Bw	Color en húmedo pardo; textura franco arcillosa; estructura en bloques angulares y subangulares, medios y gruesos, fuertes; pH 6.6, reacción neutra.
	68-130 cm Bt	Color en húmedo amarillo pardusco en 60% y pardo grisáceo en 40%; textura franco arcillosa; estructura en bloques angulares y subangulares, medios y gruesos, fuertes; se presentan frecuentes películas de arcilla y recubrimientos de materia orgánica, claros, localizados en las caras verticales y horizontales de los peds; pH 6.8, reacción neutra.


Anexo II: Perfil Modal CVC - 150

Consociación: Typic Argiustolls, fina, mezclada, activa, isohipertérmica; perfil modal CVC-150; símbolo PW125D. (Fotografía: Diego Fonseca, 2015). Fuente: Levantamiento Semidetallado de suelos, Escala 1:25:000 Cuencas Cordillera Occidental, IGAC y CVC.

Perfil CVC-150	PROFUNDIDAD cm HORIZONTE	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
	00 - 14 cm Ap	Color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro; textura franca; estructura en bloques subangulares, medios, moderados; pH 5.9, reacción moderadamente ácida.
	14 - 45 cm Bw1	Colores en húmedo pardo grisáceo muy oscuro 70% y gris muy oscuro; textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios y gruesos, fuertes; pH 6.9, reacción neutra.
	45 - 83 cm Bw2	Colores en húmedo pardo grisáceo en 70% y color pardo oliva claro; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y gruesos, moderados; pH 7.6, reacción ligeramente alcalina.
	83 - 120 cm Bw3	Colores en húmedo pardo grisáceo en 70% y color gris pardusco; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios y gruesos, moderados; pH 7.9, reacción moderadamente alcalina.


Anexo III: Perfil Modal CVC - 133

Consociación: Typic Haplustolls, franca fina, mezclada, superactiva, isohipertérmica; perfil modal CVC-133; símbolo PW125E. (Fotografía: Juan Pablo Fernández, 2015). Fuente: Levantamiento Semidetallado de suelos, Escala 1:25:000 Cuencas Cordillera Occidental, IGAC y CVC.

Perfil CVC-133	PROFUNDIDAD cm HORIZONTE	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
	00 - 55 cm Ap	Colores en húmedo gris muy oscuro; textura franco arcillo limosa; estructura en bloques subangulares, finos y medios, fuertes; pH 6.5, ligeramente ácida.
	55 - 84 cm Bw1	Colores en húmedo pardo oscuro; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares, finos y medios, fuertes; pH 7.0, neutro.
	84 – 125x cm Bw2	Colores en húmedo pardo amarillento; textura franco arenosa; estructura en bloques angulares y subangulares, finos y medios, débiles; pH 7.0, neutro.

Anexo IV: Perfil modal CVC - 132

Suelos Fluventic Haplustepts, franca fina, esmectítica, isohipertérmica, perfil modal CVC-132 (Fotografía: Claudia Porras, 2015). Fuente: Levantamiento Semidetallado de suelos, Escala 1:25:000 Cuencas Cordillera Occidental, IGAC y CVC.

Perfil CVC-132	PROFUNDIDAD cm HORIZONTE	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
	00-38 cm Ap	Colores en húmedo pardo grisáceo oscuro y pardo oliva claro en 30%; textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques subangulares, finos y medios, moderados; pH 7.0, reacción neutra.
	38-57 cm Bw1	Color en húmedo pardo grisáceo; textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques subangulares, finos y medios, débiles; pH 7.4, reacción ligeramente alcalina.
	57-73 cm 2ª	Color en húmedo pardo oscuro; textura franca; estructura en bloques subangulares, finos y medios, débiles; pH 7.5, reacción ligeramente alcalina.
	73-120 cm 3ª	Color en húmedo negro; textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques angulares y subangulares, finos, medios y gruesos, moderados; pH 7.5, reacción ligeramente alcalina.

Anexo V: Localización geográfica de calicatas CVC - RUT

Localización geográfica de calicatas CVC – RUT (Fuente CVC)

Perfil	Municipio	Cuenca	Localización	Latitud	Longitud	Altitud	Fecha
CVC-186	La Unión	RUT	Vereda La Despensa, Finca Las Acacias	4°29'51,029"N	76°9'13,500"W	1501.5	12/3/2016
CVC-132	Roldanillo	RUT	El Pie, Finca La Tierra	4°26'18,701"N	76°10'15,499"W	1095	7/10/2015
CVC-133	Roldanillo	RUT	Hacienda La Ponderosa	4°24'12,200"N	76°9'49,288"W	994	7/10/2015
CVC-150	Roldanillo	RUT	Hacienda La Suiza	4°23'51,389"N	76°10'1,960"W	1000	11/10/2015

Anexo VI: Clasificación taxonómica, pendiente, erosión, drenaje, calicatas CVC-RUT

Clasificación taxonómica, pendiente, grados erosión, drenaje natural, calicatas CVC-RUT (Fuente CVC)

Perfil	Clasificación Taxonómica	Pendiente	Grado erosión	Drenaje Natural
CVC-186	Vertic Argiustolls, franca fina, caolinitica, isotérmica	50 – 75	Moderado	Bueno
CVC-132	Fluventic Haplustepts, franca fina, esmetitica, isohipertérmica	3 – 7	No hay	Bueno
CVC-133	Typic Haplustolls, franca fina, mezclada, superactiva, isohipertérmica	3 – 7	No hay	Bueno
CVC-150	Typic Argiustolls, fina, mezclada, semiactiva, isohipertérmica	12 - 25	Ligera	Bueno

Anexo VII: Profundidad efectiva, afloramiento, pedregosidad y perfil, calicatas CVC-RUT

Profundidad efectiva, clase afloramiento, tipo pedregosidad y perfil, calicatas CVC-RUT (Fuente CVC)

Perfil	Profundidad efectiva	Clase afloramiento	Tipo pedregosidad	Tipo perfil
CVC-186	Superficial (25 cm – 50 cm)	No hay (< 0.1%)	No hay	Modal
CVC-132	Profunda (100 cm – 150 cm)	No hay (< 0.1%)	Pedregón	Modal
CVC-133	Profunda (100 cm – 150 cm)	No hay (< 0.1%)	No hay	Modal
CVC-150	Superficial (25 cm – 50 cm)	No hay (< 0.1%)	No hay	Modal

Anexo VIII: Clase pendiente, planchas cartográficas, temperatura, calicatas CVC-RUT

Clase pendiente, plancha cartográfica, régimen temperatura, calicatas CVC_RUT (Fuente CVC)

Perfil	Clase pendiente	Plancha cartográfica	Régimen de temperatura
CVC-186	Moderadamente escarpada o M. empinada (50% - 75%)	242-II-C	Isotérmica (15°C – 22°C)
CVC-132	Ligeramente inclinada (3% a 7%)	242-II-C	Isohipertérmica (>22°C)
CVC-133	Ligeramente inclinada (3% a 7%)	242-IV-A	Isohipertérmica (>22°C)
CVC-150	Fuertemente inclinada (12% a 25%)	242-IV-A	Isohipertérmica (>22°C)

Anexo IX: Clase, tipo erosión, movimientos en masa, calicatas CVC - RUT

Clase y tipo erosión, clase y frecuencia movimientos en masa, calicatas CVC-RUT (Fuente CVC)

Perfil	Clase erosión	Tipo erosión	Clase Movimientos	Tipo Movimientos	Frecuencia Movimientos en masa
CVC-186	Hídrica	Laminar	Movimiento en masa por deformaciones	Solifluxión laminar plástica (patas de vaca, terracetas)	Frecuente (25% - 50% área)
CVC-132	No hay	Sin dato	No hay	Sin dato	Sin dato
CVC-133	No Hay	Sin dato	No hay	Sin dato	Sin dato
CVC-150	Hídrica	Laminar	Movimiento en masa por deformaciones	Solifluxión laminar plástica (patas de vaca, terracetas)	Frecuente (25% - 50% área)

Anexo X: Límite profundidad efectiva, epipedon, endopedon, calicatas CVC-RUT

Límite profundidad efectiva, Epipedon, Endopedon, características diagnósticas, Calicatas CVC-RUT (Fuente CVC)

Perfil	Límite profundidad efectiva	Epipedon	Endopedon	Características diagnósticas
CVC-186	Horizonte compactado	Umbrico	Argilico	Epipedon Umbrico, endopedon Argilico, propiedades verticas, régimen de humedad ústico.
CVC-132	Sin limitaciones	Ócrico	Cámbrico	Endopedon cámbico, régimen de humedad ústico, epipedon ócrico, decrecimiento irregular de carbono orgánico.
CVC-133	Sin limitaciones	Mólico	Cámbrico	Epipedon mólico, régimen de humedad ústico.
CVC-150	Material compactado	Mólico	Argilico	Epipedon mólico, régimen de humedad ústico, endopedon argilico.

Anexo: XI: Vegetación natural, calicatas CVC - RUT

Vegetación natural, calicatas CVC-RUT (Fuente CVC)

Perfil	Vegetación natural
CVC-186	Sustituida por pasto grama, sectores con guayabo, mango, tachuelo, quiebrabarrigo, chagualo, higuierón, guamo, espantillo.
CVC-132	Guadua, aromo, cabuya, cadillo, caña brava, samán, inga.
CVC-133	Pasto estrella, pasto indio, singla, cacho de venado, aromo, samán.
CVC-150	Sustituida.

Anexo XII: Uso actual, cultivos-especies-forestal animal, limitantes, calicatas CVC-RUT

Uso actual, cultivo-especies-forestal-animal, limitantes-uso, calicatas CVC-RUT (Fuente CVC)

Perfil	Uso actual	Cultivo-especies-forestal-animal	Limitantes – Uso
CVC-186	Ganadería extensiva	Sin dato	Pendiente moderadamente escarpada
CVC-132	Agricultura	Barbecho de cultivo de Tomate y Repollo	Bajas precipitaciones
CVC-133	Ganadería, pastoreo extensivo	Sin dato	Escasas lluvias
CVC-150	Ganadería	Sin dato	Material compactado, bajas precipitaciones

El perfil presenta grietas entre 3 y 5 mm de ancho que van desde la superficie del suelo hasta los 40 cm de profundidad en las distintas caras de la calicata.